Справочник по электрическим конденсаторам

АКАДЕМИЯ НАУК МОЛДАВСКОЙ ССР
Отдел энергетической кибернетики

Справочник по электрическим конденсаторам

Общие сведения, выбор и применение

Под общей редакцией
кандидата технических наук
В. В. Ермуратского

КИШИНЕВ «ШТИИНЦА» 1982

31.264.4я2
С74

В. П. БЕРЗАН, Б. Ю. ГЕЛИКМАН, М. Н. ГУРАЕВСКИЙ,
В. В. ЕРМУРАТСКИЙ, П. В. ЕРМУРАТСКИЙ, Г. С. КУЧИНСКИЙ,
О. Л. МЕЗЕНИН, Н. И. НАЗАРОВ, В. К. РИМСКИЙ,
Б. К. СМИРНОВ, К. И. СТЕПИНА

УДК 621.319.4

В справочнике даны основные сведения о физических явлениях в конденсаторах, их конструкциях, параметрах и характеристиках. Приведены формулы для расчета электрических, тепловых нагрузок и режимов работы конденсаторов. Представлены методики определения допустимых параметров рабочего напряжения различных видов, а также выбора конденсаторов.

Книга предназначена для инженеров, занимающихся вопросами выбора и применения конденсаторов, а также для студентов электротехнических и радиотехнических специальностей.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

доктор технических наук *Г. С. Кучинский*,
кандидаты технических наук *П. В. Ермуратский, П. И. Назаров, М. Н. Гураевский; В. П. Берзан*

Рецензент
заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
доктор технических наук,
профессор *Б. М. Тареев*

С $\frac{30307—67}{М755(12)—82}$ 60.81.2302030000

© Издательство «Штиинца», 1982

ВВЕДЕНИЕ

Электрический конденсатор — устройство, способное исключительно быстро накапливать и отдавать электрическую энергию, — был изобретен в 1745 г. Однако человечеству понадобилось более столетия, чтобы начать применять его на практике. Широкое использование конденсаторов связано с бурным развитием техники: радио, связи и радиовещания, электротехники, электроэнергетики, электроники, измерительной, вычислительной техники, электротехнологии и т. д.

В настоящее время число конструктивных исполнений конденсаторов составляет тысячи и продолжает расти, а суммарный выпуск всех типов конденсаторов в мире достигает десятков миллиардов штук в год. Совершенствование конденсаторов тесно связано с развитием областей их применения. Существенные скачки обусловлены появлением новых сфер использования конденсаторов. Так, радиолокационная техника, появившаяся в начале второй мировой войны, выдвинула задачу создания специальных высоковольтных импульсных конденсаторов, обладающих большой удельной энергией и малой индуктивностью. Установки для испытания электрической изоляции, ядерных исследований, импульсной электротехнологии, а затем импульсных источников света, в том числе лазеров, вызывали более или менее значительные изменения требований к импульсным конденсаторам — основному накопительному элементу этих установок. В результате сформировалась большая группа так называемых накопительных конденсаторов, для которых характерны низкие и инфранизкие частоты повторения, хотя в последнее время наблюдается явная тенденция к повышению этой частоты.

С развитием электроэнергетики переменного тока, увеличением расстояния и передаваемой энергии, созданием объединенных энергетических систем существенно расширилось применение конденсаторов для компенсации реактивной мощности сетей и потребителей электрической энергии, для осуществления высокочастотной связи по линиям электропередачи и других целей.

Требования к уменьшению габаритов и повышению надежности конденсаторов, используемых в устройствах вычислительной, военной, бытовой, транспортной, космической, медицинской техники, электроники и электротехники, привели к созданию большого класса конденсаторов с керамическими и оксидными диэлектриками. Наряду с конденсаторами широкого применения и назначения создаются специализированные конденсаторы, например, для работы во взрывоопасных условиях, при больших гидростатических давлениях и высоких температурах. В последние десятилетия в связи с развитием космической технологии и криогенной техники усиленно разрабатываются конденсаторы для работы при температурах в единицы кельвинов.

Использование новых принципов в работе аппаратуры порождает необходимость создания конденсаторов, обладающих новыми качествами.

Так, в электронике в связи с появлением мощных транзисторов все шире используются широтно-импульсные регуляторы и стабилизаторы постоянного напряжения, работающие на частотах до десятков и даже сотен килогерц. Для фильтров этих источников потребовались конденсаторы довольно значительной емкости (десятки и сотни микрофарад), обладающие низкими значениями потерь, собственной индуктивностью и минимальным эквивалентным последовательным активным сопротивлением.

Применение электронной и другой электротехнической бортовой аппаратуры воздушных, водных, а также наземных транспортных средств потребовало создания специальных конденсаторов, устойчивых к резким колебаниям температуры, давления, механических и других воздействий в широком диапазоне. Наряду с расширением областей использования конденсаторов все более разнообразными становятся электрические и тепловые режимы их работы, в частности, формы воздействующего напряжения и тока, их параметры, характер воздействий и т. д.

Таким образом, условия работы конденсаторов в различных устройствах и аппаратуре значительно усложнились. Повысились требования к надежности, массогабаритным параметрам конденсаторов при одновременном увеличении их единичной мощности. Эти и другие причины вызвали необходимость не только создания новых конструкций конденсаторов, но и более детального изучения свойств и характеристик уже выпускаемых конденсаторов для расширения областей их применения и разработки новых типов.

Наряду с усложнением условий эксплуатации конденсаторов и увеличением числа новых разработок остро ощущается недостаток информации по некоторым техническим характеристикам конденсаторов, необходимых для их выбора и применения.

В вышедших за последние 15 лет монографиях и сборниках [В.1—В.45] излагаются общие сведения о конденсаторах, вопросы их проектирования, производства, результаты исследования свойств и характеристик конденсаторов и диэлектриков, расчета режимов работы, выбора и применения, а также справочные данные по некоторым типам конденсаторов.

Зарубежные фирмы, производящие конденсаторы, выпускают каталоги, которые содержат не только справочные данные по номинальным величинам, но и сведения по применению (в частности, приводятся методики выбора конденсаторов), что дает возможность сопоставления и определения оптимального варианта. Однако единой методики выбора не существует, так как каждая фирма создает их лишь для выпускаемых ею типов конденсаторов. К тому же степень достоверности и оптимальности этих методик различна.

В нашей стране вопросам развития теории выбора и применения конденсаторов, направленной на наиболее эффективное их использование, уделяется всевозрастающее внимание. Одними из главных являются разработки, направленные на повышение показателей надежности конденсаторов.

Настоящая книга содержит общие сведения о конденсаторах, рекомендации по расчету допустимых режимов их работы и выбору, а также некоторые справочные данные по ним. Включение общих сведений обусловлено необходимостью напомнить потребителям основные понятия и определения, касающиеся конденсаторов, а также физические явления и процессы, происходящие в них. Это поможет потребителям более сознательно подходить к расчету и выбору конденсаторов.

Необходимость включения общетеоретических рекомендаций по применению конденсаторов диктовалась рядом обстоятельств. Одно из них — это то, что к настоящему времени в основном сформировались принципы правильного выбора конденсаторов при максимально возможном использовании их энергетических характеристик. Но эти принципы еще недостаточ-

но полно отражены в нормативной документации и, в лучшем случае, являются достоянием разработчиков конденсаторов.

Настоящий справочник поможет и технически грамотнее сформулировать требования к вновь разрабатываемым конденсаторам, а разработчики получат дополнительную информацию для оценки возможности изготовления конденсаторов по этим требованиям. Установление более четких связей между условиям эксплуатации и работоспособностью конденсаторов, появление новых их групп обусловили некоторую трансформацию классификации режимов работы и самих конденсаторов. Имевшееся определенное отставание конденсаторостроения в области нормирования параметров и характеристик, необходимых для правильного выбора и применения конденсаторов,— одна из причин значительного недоиспользования их по электрическим и тепловым нагрузкам, а подчас и существенного сокращения срока службы из-за перегрузок.

По данным зарубежной печати, около 25% отказов электронной аппаратуры происходит из-за конденсаторов, причем 50% отказов объясняется их неправильным применением.

Правильный выбор конденсаторов — важная задача оптимального их использования, т. е. обеспечения работоспособности и минимальных массогабаритных параметров. Но она осложнена отсутствием единой методики выбора, недостаточной разработкой отдельных теоретических и экспериментальных задач. Неодинаково глубоко исследованы различные типы конденсаторов. В значительной мере это обусловлено отсутствием соответствующих измерительных устройств (например, для измерения зависимости тангенса угла потерь, эквивалентного последовательного активного сопротивления и емкости в широком диапазоне температур, частот и номинальных параметров конденсаторов), а также стендов для проведения их ресурсных испытаний на переменном напряжении различных форм и частот.

Решение таких задач, как определение зависимости показателей долговечности от условий эксплуатации, тепловых параметров, допустимых токовых нагрузок, разработка систем автоматизированного выбора и проектирования конденсаторов, связано с большими временными и материальными затратами, широким применением ЭВМ.

В связи с наметившейся тенденцией развернутой аттестации конденсаторов, выявления их скрытых резервов авторы справочника поставили перед собой задачу суммировать сведения о параметрах и характеристиках конденсаторов, методах расчета нагрузок и режимов, необходимых для оптимального их использования (четвертая—восьмая главы).

Справочник подготовили: *В. П. Берзан* (§ 1.3, 1.4, 4.1, 4.2, 4.4, 5.2), *Б. Ю. Геликман* (§ 4.8), *М. Н. Гураевский* (§ 1.2, 4.4, 4.8, 5.5, 6.3, приложение 3), *В. В. Ермуратский* (§ 1.1, 1.5, 2.1—2.3, 2.5, 2.6, 3.2, 4.3, 4.5, 4.7, 4.8, 5.1, 5.3, 5.5, 6.1, 6.2, седьмая и восьмая главы), *П. В. Ермуратский* (§ 2.1—2.3, 4.3, 5.3), *Г. С. Кучинский* (§ 2.4, 3.2, 4.6, приложение 8), *О. Л. Мезенин* (§ 5.3, приложение 2), *Н. И. Назаров* (§ 3.1, 3.2, 4.9), *В. К. Римский* (§ 5.4, приложения 1, 2, 4 и 5), *Б. К. Смирнов* (§ 1.3, 1.4, 3.1—3.4), *К. И. Степина* (§ 3.1—3.3).

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В СПРАВОЧНИКЕ

Величины, характеризующие электрические напряжения, токи и мощности

$U_н$ — номинальное напряжение конденсатора
u — мгновенное значение напряжения
$u_\sim$ — мгновенное значение переменной составляющей напряжения
$U_о$ — постоянная составляющая напряжения
$U_{од}$ — предельно допустимая постоянная составляющая напряжения на конденсаторе
U — действующее значение периодического напряжения
$U_д$ — предельно допустимое действующее значение периодического напряжения
$U_\sim$ — действующее значение периодической переменной составляющей напряжения
U_m — амплитуда (максимальное по модулю значение) напряжения
$U_{mд}$ — предельно допустимая амплитуда напряжения на конденсаторе
U_m^+ — максимальное положительное значение напряжения
U_m^- — максимальное отрицательное значение напряжения
$U_{п.п}$ — полный размах напряжения
$U_{п.п.д}$ — предельно допустимый полный размах напряжения
$U_п^+$ — пиковое (максимальное) положительное значение переменной составляющей напряжения
$U_п^-$ — пиковое (максимальное) отрицательное значение переменной составляющей напряжения
$U_{ис}$ — испытательное напряжение
$U_р$ — рабочее напряжение
$U_{пр}$ — пробивное напряжение
E — напряженность электрического поля в диэлектрике
i — мгновенное значение тока
I — действующее значение периодического тока
$I_д$ — предельно допустимое действующее значение тока
I_m — амплитуда (максимальное по модулю значение) тока
$I_и$ — действующее значение импульса тока за время $t_и$
$I_{ут}$ — ток утечки конденсатора
q — электрический заряд
S — полная мощность
P — активная мощность, мощность потерь электрической энергии (или мощность тепловыделения) в конденсаторе
$P_д$ — предельно допустимая мощность тепловыделения в конденсаторе
Q — реактивная мощность конденсатора
$Q_н$ — реактивная мощность конденсатора при номинальных параметрах
W — энергия конденсатора
$P_{чр}$ — мощность частичных разрядов

Величины, характеризующие параметры конденсаторов

Электрические параметры

C — электрическая емкость конденсатора
$C_н$ — номинальная емкость конденсатора
$C_з(\omega)$ — сумма геометрической емкости конденсатора и емкости, обусловленной его диэлектриком, в последовательной схеме замещения
$C_р(\omega)$ — сумма геометрической емкости конденсатора и емкости, обусловленной его диэлектриком, в параллельной схеме замещения
$C_{рэ}(\omega)$ — эквивалентная (эффективная) емкость конденсатора в параллельной схеме замещения
$C_{зэ}(\omega)$ — эквивалентная (эффективная) емкость конденсатора в последовательной схеме замещения
ε_0 — электрическая постоянная
ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость
$R_{из}$ — сопротивление изоляции конденсатора на постоянном напряжении
$\tau_{из}$ — постоянная времени саморазряда конденсатора
$tg\delta(\omega)$ — тангенс угла потерь конденсатора
$r_з(\omega)$ — эквивалентное активное сопротивление конденсатора в последовательной схеме замещения
$r_м(\omega)$ — эквивалентное активное сопротивление металлических частей конструкции конденсатора в последовательной схеме замещения
$r_д(\omega)$ — эквивалентное активное сопротивление диэлектрика конденсатора в последовательной схеме замещения
$R_р$ — активное сопротивление конденсатора в параллельной схеме замещения
$L_э$ — эквивалентная индуктивность конденсатора

Тепловые параметры и теплофизические характеристики

$R_т$ — полное тепловое стационарное сопротивление конденсатора
$R_т(t)$ — переходное полное тепловое сопротивление конденсатора
$R_{тm}$ — стационарное максимальное полное тепловое сопротивление конденсатора
$R_{т.с}$ — стационарное среднее полное тепловое сопротивление конденсатора
$R_{т.в.m}$ — стационарное внутреннее максимальное тепловое сопротивление конденсатора
$R_{т.в.с}$ — стационарное внутреннее среднее тепловое сопротивление конденсатора
$R_{т.н}$ — стационарное наружное тепловое сопротивление конденсатора
$\tau_т$ — эквивалентная тепловая постоянная времени конденсатора
λ — коэффициент теплопроводности
α — коэффициент теплоотдачи
$C_т$ — теплоемкость

Обозначения временных величин и температур

t — текущее время
$t_и$ — длительность импульса
$t_ф$ — длительность фронта импульса
T — период колебаний тока и напряжения
$T_п$ — период повторения

τ — постоянная времени RC-цепи

τ_γ — гамма-процентный ресурс

τ_c — срок службы

$t_р$, $t_п$ и $T_ц$ — продолжительность интервала нагружения, паузы и цикла в прерывистых режимах

$\tau_э$ — энергетическая длительность импульса тока

$\theta(t)$ — мгновенное значение превышения температуры

Θ_m — максимальное превышение температуры

$\Theta_{m\,у}$ — превышение температуры теплового центра конденсатора над температурой охлаждающей среды в стационарном тепловом режиме

$\Theta_к$ — превышение температуры корпуса в стационарном тепловом режиме

$\Theta_с$ — превышение среднеобъемной внутренней температуры конденсатора над температурой охлаждающей среды в стационарном тепловом режиме

T — температура

$T_{о\,max}$ — максимальная температура окружающей среды

$T_{о\,min}$ — минимальная температура окружающей среды

T_m — максимальная температура внутри конденсатора

$T_{мд}$ — предельно допустимая температура внутри конденсатора

$T_с$ — средняя по объему внутренняя температура конденсатора

$T_{ср}$ — средняя за цикл нагружения температура конденсатора

$T_к$ — средняя по поверхности температура корпуса конденсатора

$T_{кр}$ — температура критического теплового режима

ω — угловая частота напряжения или тока, изменяющихся во времени по синусоидальному закону

f — частота напряжения или тока, изменяющаяся во времени по синусоидальному закону

ω_0 и f_0 — частоты электрического резонанса

Раздел I. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О КОНДЕНСАТОРАХ

Глава 1. Общие сведения о конденсаторах

§ 1.1. Функции и области применения

Электрические конденсаторы в электронных, радиотехнических, электротехнических и электроэнергетических устройствах выполняют функции накопителя энергии, источника реактивной мощности, частотно-зависимого реактивного сопротивления. Осуществляют они это благодаря своей способности накапливать электрическую энергию, а затем отдавать ее в нагрузочную цепь.

Импульсы тока большой мощности используются для создания экстремальных по напряженности магнитных полей и мощных дуговых разрядов в газах и жидкостях.

Импульсы высокого и сверхвысокого напряжений применяются в технике высоких напряжений в испытательных и исследовательских целях.

Емкостные накопители энергии используются в установках для исследования физики плазмы, термоядерных реакций, испытаний различного оборудования, в электротехнологических устройствах (магнитно-импульсная штамповка, установки, использующие электрогидравлический удар, импульсная электросварка, намагничивание, ультразвуковая технология, электроискровая технология обработки, электроплазмолиз и т. д.). Накопительные конденсаторы широко используются в различных устройствах импульсной связи, радиолокации, навигации, в импульсных источниках света (высокоинтенсивные источники — лампы-вспышки, сигнальные установки — маяки, оптические квантовые генераторы — лазеры и т. д.), импульсной рентгеновской технике.

Конденсаторы применяются в технике сейсморазведки (электродинамическое импульсное возбуждение упругих волн в земной коре), для подрыва детонаторов, в медицине (импульсный дефибриллятор) и т. д.

Накопители для генераторов мощных импульсов тока могут быть простейшими (в виде конденсатора или батарей конденсаторов) и более сложными (искусственные длинные линии, например, цепочный формирователь, либо набор параллельных *LC*-формирователей).

В них конденсаторы относительно долго накапливают электрическую энергию от сравнительно маломощного источника, а затем быстро отдают ее в нагрузку. Накопительные конденсаторы используются, в частности, в диодно-конденсаторных умножителях напряжения.

Основным рабочим процессом в ряде устройств с емкостным накоплением энергии является не отдача ее в нагрузку, а накопление. Способность конденсатора быстро накапливать электрическую энергию используется при создании различных устройств для защиты электрического оборудования и его элементов от перенапряжений, обусловленных грозовыми или коммутационными явлениями. Это свойство, а также сравнительно малые габариты, высокая надежность конденсаторов обусловили, в частности, их широкое использование в демпфирующих цепях мощных высоковольтных преобразователей, для выравнивания напряжений на последовательно включенных вентилях.

В тиристорных преобразователях (выпрямителях, инверторах, импульсных регуляторах), в бесконтактной коммутационной аппаратуре конденсаторы применяют для принудительного включения и выключения диодов и вентилей с неполной управляемостью. Коммутирующие конденсаторы в бесконтактных аппаратах работают в накопительном режиме, тогда как в преобразователях рабочими процессами обычно являются заряд и разряд (или перезаряд) конденсатора.

Свойство конденсатора накапливать электрическую энергию широко применяется и для подавления импульсных помех в различном электронном оборудовании, для создания ячеек памяти ЭВМ, интегрирования и дифференцирования электрических сигналов (аналоговые ЭВМ, системы автоматики, управления и т. д.).

Широко используются накопительные свойства конденсаторов при их применении в разнообразных импульсных устройствах малой мощности: в генераторах импульсов тока и напряжения специальной формы (развертывающие, измерительные устройства и т. д.), в автоколебательных и спусковых устройствах. Конденсаторы очень час-

то служат источником реактивной мощности. Это свойство проявляется тогда, когда на них воздействует переменное (обычно синусоидальное по форме) напряжение. Ток, протекающий через конденсатор, опережает напряжение на угол, близкий к $\pi/2$, т. е. конденсатор, почти не потребляя активную мощность, генерирует реактивиую. Эта способность используется для повышения коэффициента мощности потребителей электрической энергии путем частичной или полной компенсации их реактивной мощности, что снижает потери энергии в генераторах, трансформаторах, электрических сетях, повышает устойчивость параллельной работы энергосистем, стабилизирует напряжеиие у потребителей.

Для повышения устойчивости параллельной работы и пропускной способности линий электропередачи, а также для улучшения режима работы энергосистем применяют установки продольной компенсации, главным элементом которых являются мощные батареи конденсаторов, осуществляющие компенсацию индуктивных сопротивлений высоковольтных линий электропередачи. Установки продольной компенсации реактивной мощности используются на электрифицированных железных дорогах.

В последнее время батареи конденсаторов продольной компенсации стали применяться для рудиотермических плавильных печей большой мощности (тысячи и десятки тысяч киловатт), т. е. при резко переменной нагрузке.

Продольная емкостная компенсация реактивной мощности эффективно используется для пуска асинхронных машин большой мощности при их питании по линиям с большим сопротивлением (линии недостаточной мощности и относительно большой длины). В эиергосистемах конденсаторы применяются в батареях как продольной, так и поперечной централизованиой компенсации реактивиой мощности. Они обеспечивают снижение потерь энергии и улучшают режимы работы энергосистем (совместно с электростаициями обеспечивают необходимые напряжения в узлах и потоки энергии). В обоих видах батарей используется последовательно-параллельное соединение большого числа единичных конденсаторов.

Конденсаторы широко применяются не только в установках централизованной компенсации реактивной мощности, но и в установках для групповой и индивидуальной компенсации. Такими примерами могут служить конденсаторы для светильников с газоразрядиыми лампами, пусковые и рабочие конденсаторы однофазных асинхронных электродвигателей (в этом случае осиовная функция конденсаторов заключается в создании фазового сдвига $\pi/2$ между токами обмоток двигателей), конденсаторы, повышающие очень низкий коэффициент мощности иидукционных электротермических установок промышленной и повышенных частот. Групповая и индивидуальная компенсация реактивной мощности потребителей дает большой экономический эффект в связи со снижением потерь энергии при ее передаче, уменьшением посадки напряжения при пиковых нагрузках, а также при необходимости реконструкции энергетических сетей (из-за недостаточной мощности питающих линий, трансформаторов и т. д.).

Способность конденсаторов компенсировать реактивную мощность потребителей электроэнергии применяется не только на частоте 50—60 Гц, но и на повышенных частотах работы, например, бортовых систем транспортных средств, электротермических установок. В этом случае существенно снижаются масса и габариты первичного генератора электроэнергии.

Компенсация конденсаторами реактивной мощиости асинхронной машины позволяет создавать асинхронные генераторы, эффективные при перемеиной скорости вращения первичного двигателя (гидравлические, газовые турбины). В них конденсаторы обеспечивают возбуждение магнитного потока и компенсацию реактивной мощности нагрузки.

Полная компенсация конденсаторами реактивной мощности катушек индуктивностей происходит также в мощных колебательных контурах генераторов радиопередатчиков. Без конденсаторов невозможна работа этих устройств с высоким коэффициентом полезного действия и малыми искажениями, а также генерирование больших активных мощностей.

Другое свойство конденсаторов — изменять свое реактивное сопротивление при переменном токе обратно пропорциональио частоте ($x_c = 1/2\pi fC$) — широко используется при создании различных фильтров в радиотехнических, электронных, электротехнических устройствах, служащих для разделеиия напряжений и токов различных частот.

Фильтры низких, высоких частот, полосовые и режекторные, представляющие собой комбинацию индуктивных и емкостных, резистивных и емкостных элементов, являются иеотъемлемыми узлами большинства электронных и радиотехнических устройств. Фильтры используются также в энергетических системах. С их помощью маломощные высокочастотные сигналы, применяемые для связи, телемеханики, систем противоаварийной автоматики и других целей, отделяются от напряжений промышленной частоты высокого напряжения. Силовые фильтры используются в электроэнергетике для приближения формы напряжеиия к синусоидальной при наличии источников высших гармоник (выпрямителей), дуговых печей и др.), в силовых полупроводниковых преобразователях, работающих в автономном или в ведомом сетью режиме.

В реактивных фильтрах, резонансных умножителях напряжения и других устройствах используются резонансные свойства цепей, состоящих из конденсаторов и индуктивностей.

Конденсаторы применяются в фильтрах не только переменного, но и постоянного тока, в которых полезной составляющей является постоянное напряжение, а задача

фильтра заключается в сглаживании пульсаций напряжения (путем снижения переменной составляющей), т. е. здесь одновременно используется способность конденсатора накапливать энергию и снижать свое сопротивление с частотой. Такие фильтры применяются в блоках питания различных электронных и электротехнических устройств, например, в высоковольтных установках электростатической окраски, очистки газов, в импульсных стабилизаторах напряжения, ЭВМ и др.

Свойство конденсаторов снижать свое сопротивление с ростом частоты обуславливает их широкое использование в электронной и радиоэлектронной аппаратуре в качестве блокирующего или помехоподавляющего элемента. Роль конденсатора в этом и в предыдущем случаях заключается в том, чтобы замкнуть путь высокочастотных токов, не допустив их прохождения через другие цепи и элементы устройств, например в питающую сеть.

Конденсаторы являются неотъемлемым элементом фазосдвигающих цепей электронных устройств систем автоматики, управления, в *LC*- и *RC*-генераторах, в активных фильтрах и т. д.

Одна из многочисленных задач, решаемых с помощью конденсаторов, заключается в делении переменного напряжения, осуществляемого при различных изменениях в высоковольтных цепях, в электроэнергетических системах, испытательных установках, в равномерном распределении напряжения на разрывных промежутках воздушных высоковольтных выключателей и для других целей.

Конденсаторы широко используются:

— в емкостных делителях напряжения для отбора энергии от высоковольтных линий электропередачи (при небольших мощностях стоимость конденсаторного отбора ниже стоимости устройства отбора энергии с помощью обычных трансформаторов);

— как балластное сопротивление в люминесцентных источниках света, лампах накаливания, а также в маломощных устройствах для зарядки аккумуляторов;

— во вторичных источниках питания со специальными характеристиками (стабилизаторы тока, напряжения), в частности, в индуктивно-емкостных преобразователях, служащих для питания неизменным током установок плазменной технологии, сварки и т. д.

Индуктивно-емкостные устройства применяются и для симметрирования напряжений трехфазной сети при наличии несимметричных потребителей, а также для создания расщепителей числа фаз, необходимых для питания трехфазных потребителей от однофазной сети.

Таким образом, область применения конденсаторов достаточно широка: энергетика, промышленность, транспорт, устройства связи, автоматика, вещание, локация, измерительная и вычислительная техника и др.

§ 1.2. Условия эксплуатации конденсаторов. Требования и определения

Работоспособность конденсаторов различных электротехнических и электронных устройств зависит от условий эксплуатации, характеризующихся электрическими нагрузками, климатическими и механическими факторами внешней среды, специальными факторами (например, ионизирующими излучениями).

Требования к конденсаторам приводятся в ТУ и ГОСТах для каждого типа. Условия эксплуатации с учетом воздействия климатических и механических факторов регламентируются в ТУ, ГОСТ 15150-69, ГОСТ 15543-70, ГОСТ 16962-71, ГОСТ 17516-72, ГОСТ 17799-72, ГОСТ 4401-73 (§ 1.5).

Климатические факторы внешней среды

К климатическим факторам относятся: температура, влажность воздуха, давление окружающей среды (воздуха или газа), действие плесневых грибков, солнечная радиация, дождь, ветер, пыль (в том числе снежная), соляной туман, иней, содержание в воздухе коррозионно-активных агентов.

Конденсаторы применяются в устройствах, эксплуатируемых в различных климатических условиях, в зависимости от которых предусматриваются определенные климатические исполнения конденсаторов (ГОСТ 15150-69). Приводятся буквенные русские обозначения, в скобках — обозначения, принятые в некоторых странах СЭВ. Эти обозначения используются в конструкторской документации (§ 1.4).

Для эксплуатации на суше, реках и озерах

У(*N*) — для макроклиматических районов с умеренным климатом

ХЛ(*F*) — для макроклиматических районов с холодным климатом

ТВ (ТН) — для макроклиматических районов с влажным тропическим климатом

ТС(ТА) — для макроклиматических районов с сухим тропическим климатом

Т(Т) — для макроклиматических районов как с сухим, так и влажным тропическим климатом

О(*U*) — для всех макроклиматических районов на суше (общеклиматическое исполнение)

Для эксплуатации на морских судах

М(М) — для макроклиматических районов с умеренно холодным морским климатом

ТМ(МТ) — для макроклиматических районов с тропическим морским климатом для судов каботажного плавания или иных судов, предназначенных для плавания только в тропической зоне

Таблица 1.2.1

Укрупненные категории размещения		Дополнительные категории размещения	
характеристика	обозначение	характеристика	обозначение
Для работы на открытом воздухе	1	Изделия, хранящиеся в процессе эксплуатации в помещениях категории 4 и работающие как в условиях категории 4, так и (кратковременно) в других условиях, в том числе на открытом воздухе	1.1
Для работы в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе и имеется сравнительно свободный доступ наружного воздуха, например, в кожухе комплексного устройства изделия категории 1 или под навесом (отсутствие прямого воздействия солнечной радиации и атмосферных осадков)	2	—	—
Для работы в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, где колебания температуры и влажности воздуха и воздействие песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе	3	—	—
Для работы в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями, например, в закрытых отапливаемых или охлаждаемых и вентилируемых производственных помещениях	4	Помещения с кондиционированным или частично кондиционированным воздухом Помещения лабораторные, капитальные жилые и другие подобного типа	4.1 4.2
Для работы в помещениях с повышенной влажностью	5	—	—

ОМ(*MU*) — для неограниченного района плавания

В(*W*) — для всех макроклиматических районов на суше и на море

Конденсаторы в указанных климатических исполнениях в зависимости от места размещения и эксплуатации изготавливают по категориям (табл. 1.2.1).

Климатические факторы внешней среды характеризуются нормальными, номинальными, рабочими и предельными значениями.

Нормальные — это уточненные для использования в технике естественно изменяющиеся значения климатических факторов в пределах данной географической зоны с учетом места размещения конденсатора.

Номинальные — нормируемые в технических заданиях (ТЗ), стандартах или ТУ значения климатических факторов (естественно изменяющиеся или неизменные), при которых обеспечивается нормальная эксплуатация конденсаторов.

Рабочие — естественно изменяющиеся или неизменные значения климатических факторов, при которых обеспечивается сохранение требуемых номинальных параметров и экономически целесообразных сроков службы конденсаторов.

Предельные — это значения климатических факторов, при которых конденсаторы могут (чрезвычайно редко и в течение не более 6 часов) оказаться при эксплуатации и должны при этом: а) сохранять работоспособность, но могут не сохранять требуемой точности номинальных параметров; б) после прекращения действия этих предельных значений восстанавливать требуемую точность и номинальные параметры. Нормальные значения климатических факторов внешней среды при эксплуатации изделий по ГОСТ 15150-69 приведены в табл 1.2.2. Для покрытий поверхностей, подвергаемых нагреву солнцем, верхнее и среднее значения рабочей и предельной температур должны приниматься выше, чем указано в табл. 1.2.2 для изделий категории 1, для поверхностей, имеющих белый или серебристо-белый цвет,— на 15°С; для поверхностей, имеющих иной, кроме белого или серебристо-белого, цвет,— на 30°С (ГОСТ 15150-69).

Изменения температуры окружающего воздуха за 8 часов составляют: для исполнений У, ХЛ, Т, ТС, ОВ — 40°С; для исполнений ТВ, ТМ — 10°С, для исполнений М, ОМ — 30°С.

Кроме внешней температуры (температуры окружающего воздуха), экстремаль-

ные значения которой достигают минус 60÷плюс 55°С (см. табл. 1.2.2), на конденсаторы воздействует тепловыделение других сильно нагревающихся в процессе эксплуатации аппаратуры радиодеталей. Поэтому температура окружающего конденсатор воздуха в блоках аппаратуры может намного превышать предельные значения, указанные в табл. 1.2.2.

Под температурой окружающего воздуха для встроенных элементов понимают [В.30]: температуру воздуха в точке, удаленной на расстояние 15—20 мм от конденсатора, если другие тепловыделяющие радиодетали расположены на расстоянии не ближе 30 мм; в случае плотного монтажа, когда расстояние между конденсатором и радиодеталью меньше 30 мм, принимается средняя между ними температура. В этой связи в табл. 1.2.3 приведены интервалы допустимых (по ГОСТ и ТУ) рабочих температур конденсаторов.

Нормирование условий эксплуатации по влажности

Технические условия и стандарты на конденсаторы обычно оговаривают максимально допустимое значение относительной влажности при конкретной температуре. В табл. 1.2.4 приведены значения относительной влажности внешней среды, отражающие реальные условия эксплуатации (температуру, климатическое исполнение, категорию размещения, продолжительность воздействия) и соответствующие степени жесткости (ГОСТ 15150-69, ГОСТ 16962-71).

В ряде случаев большое влияние на эксплуатационные характеристики конденсаторов оказывает давление окружающей среды. При эксплуатации конденсаторов в наземных условиях (нормальная высота над уровнем моря не более 1000 м) рабочее значение атмосферного давления составляет 865—1070 гПа (650—800 мм рт. ст.), нижнее предельное—840 гПа (630 мм рт. ст.).

При работе конденсаторов в составе бортовой аппаратуры средние рабочие значения атмосферного давления в зависимости от высоты над уровнем моря принимаются по ГОСТ 4401-73 (табл. 1.2.5).

Конденсаторы, которые при эксплуатации подвергаются непосредственному облучению солнцем, должны быть устойчивы к воздействию солнечной радиации, характеризующейся для высот до 15 км включительно верхними значениями интегральной плотности теплового потока 1125 Вт/м² [0,027 кал/(см²·с)], в том числе плотности потока ультрафиолетовой части спектра (длина волны 280—400 мкм) 42 Вт/м² [0,001 кал/см²·с)].

Конденсаторы должны быть устойчивыми к непосредственному воздействию дождя, верхнее рабочее значение которого составляет: для исполнений ТВ, Т, ОМ, ТМ, ОМ, В — 5 мм/мин, У, ХЛ, ТС — 3 мм/мин. Интенсивность падения капель (верхнее рабочее значение) для изделий исполнений М, ТМ, ОМ 5-й категории размещения равна 0,4 мм/мин при угле от 90 до 45° к горизонту.

Плотность озона в приземном (приводном) слое воздуха (верхнее рабочее значение) для исполнений ХЛ, ТВ, Т, О, ТМ, М, ОМ, В составляет 40 мкг/м³, для исполнений ТС, У — 20 мкг/м³.

Верхнее предельное значение скорости ветра 50 м/с.

Таблица 1.2.2

Вид исполнения	Категория размещения изделия	Нормальное значение температуры воздуха при эксплуатации, °С				
		рабочая			предельная	
		верхнее	нижнее	среднее	верхнее	нижнее
У	4	+35	+1	+20	+40	+1
	4.1	+25	+10	+20	+40	+1
	4.2	+35	+10	+20	+40	+1
	5	+35	—5	+10	+35	—5
	1.1;1; 2;3	+40	—40	+10	+45	—50
ХЛ	4	+35	+1	+20	+40	+1
	4.1	+25	+10	+20	+40	+1
	4.2	+35	+10	+20	+40	+1
	5	+35	—10	+10	+35	—10
	1.1;1; 2;3	+40	—60	+10	+35	—60
ТВ	4	+45	+1	+27	+50	+1
	4.1	+25	+10	+20	+40	+1
	4.2	+45	+10	+27	+45	+10
	5	+35	+1	+10	+35	+1
	1.1;1; 2;3	+45	+1	+27	+50	—10
Т, ТС	4	+45	+1	+27	+55	+1
	4.1	+25	+10	+20	+40	+1
	4.2	+45	+10	+27	+45	+10
	5	+35	+10	+10	+35	+1
	1.1;1; 2;3	+45	—10	+27	+55	—20
О	4	+45	+1	+27	+55	+1
	4.1	+25	+10	+20	+40	+10
	4.2	+45	+10	+27	+45	+1
	5	+35	+10	+10	+35	+10
	1.1; 2;3	+45	—60	+27	+55	—60
М	4	+40	—10	+20	+40	—10
	4.1	+35	+15	+20	+40	+1
	1,1;1; 2;3;5	+40	—40	+10	+45	—40
ТМ	4	+45	+1	+27	+45	+1
	4.1	+25	+10	+20	+40	+1
	1,1;1; 2;3;5	+45	+1	+27	+45	+1
ОМ	4	+45	—10	+27	+45	—10
	4.1	+35	+15	+20	+45	+1
	1,1;1; 2;3;5	+45	—40	+27	+45	—40
В	4	+45	+1	+27	+55	+1
	4.1	+25	+10	+20	+40	+1
	5	+45	—40	+27	+45	—40
	1,1;1; 2;3	+45	—60	+27	+55	—60

Таблица 1.2.5

Типы конденсаторов	Интервал температур, °С	Пример	Типы конденсаторов	Интервал температур, °С	Пример
	—60÷(+70)	В, КВ	Металлобумажные	0÷+35	К42Ч-6
Вакуумные	—60÷(+85)	К61-6, К61-7,		—60÷(+60)	МБГВ
	—60÷(+125)	К61-4, К61-5		—60÷(+70)	МБГИ, МБГН
	—60÷(+200)	К61-9		—60÷(+100)	МБГТ
	—25÷(+85)	КЛС, КТП		—60÷(+60)	К70-7
	—60÷(+100)	КТ-1Е, КТП	Полистирольные	—60÷(+70)	К71-6
Керамические	—60÷(+125)	К10-17-1		—60÷(+85)	К71-4
	—60÷(+155)	КМ-6		—60÷(+100)	К71-3
	—60÷(+100)	К21-5		—60÷(+70)	К72-11
	—60÷(+155)	К21-7,	Фторопластовые	—60÷(+155)	ФГТИ
Стеклянные		К21-8			
	—60÷(+200)	К21У-3		—60÷(+200)	К72-9
	—60÷(+300)	К21У-1			
	—60÷(+100)	ДС, КС-3	Полиэтилентерефталатные (лавсановые)	—60÷(+70)	К73П-4
				—60÷(+100)	К73-9
Стеклоэмалевые				—60÷(+125)	К73-11
	—60÷(+155)	КС-4			
	—60÷(+85)	К22-4, К22-5	Комбинированные	—60÷(+100)	К75-10
				—60÷(+125)	К75-24
Стеклокерамические	—60÷(+100)	СКМ-2			
	—60÷(+125)	К22-6	Лакопленочные	—60÷(+70)	К76-4
	—60÷(+155)	СКМ-2		—60÷(+85)	К76-3
	—60÷(+200)	СКМ-Т			
	—60÷(+70)	К31П-4 КСО		—10÷(+60)	К50-7
	—60÷(+85)	СГМ, К31-11		—10÷(+70)	К50-6
	—60÷(+125)	К31-10, К31-7А			
Слюдяные	—60÷(+155)	КСОТ	Электролитические алюминиевые	—20÷(+60)	К50-9
	—60÷(+200)	КСОТ-200		—20÷(+70)	К50-12
	—60÷(+500)	К31П-1		—40÷(+60)	К50-ЗИ
				—40÷(+70)	К50-24
				—60÷(+85)	К50-15
	—60÷(+50)	К40-11			
	—60÷(+70)	БМ			
Бумажные	—60÷(+85)	К40П-2	Электролитические танталовые объемно-пористые	—60÷(+85)	К52-1
	—60÷(+100)	БМТ		—60÷(+100)	ЭТО
	—60÷(+125)	К41-1, К40У-9		—60÷(+155)	К52-7
				—60÷(+200)	К52-5
Оксидно-металлические	—60÷(+300)	К54-2	Оксидно-полупроводниковые	—80÷(+85)	К53-1
				—80÷(+125)	К53-1А
				—60÷(+85)	К53-4
				—60÷(+125)	К53-1А

На эксплуатационные характеристики конденсаторов в ряде случаев оказывает большое влияние газовый состав окружающей среды. Содержание в атмосфере на открытом воздухе коррозионно-активных агентов приведено в ГОСТ 15150-69.

Механические факторы

К механическим факторам, влияющим на работоспособность конденсаторов при их эксплуатации, относятся: вибрационные, ударные (многократные, одиночные) и линейные (центробежные) нагрузки.

Значения механических воздействий (ГОСТ 16962-71) для изделий электронной техники и электротехники, в том числе и для конденсаторов, приведены в табл. 1.2.6. Испытания конденсаторов на ударную прочность проводят с общим количеством многократных ударов, равным 10 000 для степеней жесткости I и II, 4000 — для степеней жесткостн III и IV и равным девяти — для одиночных ударов.

Таблица 1.2.4

Вид исполнения	Категория размещения изделия	Относительная влажность: среднемесячные значения в наиболее теплый и влажный периоды, % при температуре, °С	Относительная влажность: максимальное значение	Относительная влажность: продолжительность воздействия в течение года, мес	Степень жесткости по влажности
У, ХЛ, ТС	4;4.1;4.2	65(20)	80% при 25°С и при более низких температурах, без конденсации влаги	12	I
ТС	2;3	65(20)	То же	12	I
ТС	1	65(20)	100% при 10°С и при более низких температурах, с конденсацией влаги	12	I
У, ХЛ	1;1	80(20)	98% при 25°С и при более низких температурах, без конденсации влаги	2	II
У, ХЛ	3	80(20)	То же	6	III
У, ХЛ	1;2	80(20)	100% при 25°С и при более низких температурах, с конденсацией влаги	6	IV
У, ХЛ	5	90(20)	То же	12	V
ТВ, Т, О, В, ТМ, ОМ*	4.2	80(27)	98% при 35°С и при более низких температурах, без конденсации влаги	3	VI
М	3;4	80(20)	То же	6	VI
ТС	3;4	80(27)	» »	12	VII
М	1;2	90(20)	100% при 25°С и при более низких температурах, с конденсацией влаги	6	VII
ТВ, Т, О, В, ТМ, ОМ**	1;2;5	90(27)	100% при 35°С и при более низких температурах, с конденсацией влаги	12	VIII

* Для морских судов исполнения ОМ, предназначенных для непродолжительного пребывания в районах с тропическим климатом, значения сочетания температуры и влажности допускается принимать такими же, как и для исполнения М.

** При более высоких температурах относительная влажность ниже.

Таблица 1.2.5

Высота над уровнем моря, тыс. м	Атмосферное давление, гПа(мм рт. ст.): нижнее значение	Атмосферное давление, гПа(мм рт. ст.): среднее значение	Высота над уровнем моря, тыс. м	Атмосферное давление, гПа(мм рт. ст.): нижнее значение	Атмосферное давление, гПа(мм рт. ст.): среднее значение
1	865(650)	897(674)	10	243(182)	266(199)
2	732(550)	794(596)	12	180(135)	193(145)
3	639(480)	700(526)	14	128(96)	141(106)
4	559(420)	628(462)	15	106,5(80)	121(91)
5	480(360)	540(405)	16	85(64)	104(78)
6	420(315)	472(354)	18	64(48)	76(57)
7	366(275)	410(308)	20	44(33)	54(41)
8	313(235)	356(267)	26	20(15)	21,3(16)
9	280(210)	308(231)	31	10(7,5)	10,25(7,7)

Так как конденсаторы относятся к изделиям массового применения и используются для комплектации аппаратуры и устройств различного назначения, их конструкции проектируются с расчетом на максимальную степень жесткости для каждого из видов воздействующих нагрузок.

§ 1.3. Классификация конденсаторов

Электрические конденсаторы можно разделить на две группы: силовые, применяемые в электротехнических и электроэнергетических установках; конденсаторы, используемые в электронных и радиотехнических устройствах.

Силовые конденсаторы классифицируются в соответствии с их функциональным назначением по роду напряжения и конструктивному исполнению [В.1, В.9].

По ***функциональному признаку*** они делятся на конденсаторы: для повышения коэффициента мощности электроустановок переменного тока; продольной емкостной компенсации линий электропередачи и регулирования напряжения в распределительных сетях; высокочастотной связи и защиты линий электропередачи высокого напряжения; отбора мощности от линий электропередачи высокого напряжения; для делителей напряжения; электротерми-

Таблица 1.2.6

Воздействующие факторы	Значения параметров механических воздействий			Степень жесткости
	диапазон частот, Гц	максимальное ускорение, м/с²	длительность удара, мс	
Вибрационные нагрузки	1—35	4,91	—	I
	1—50	4,91	—	IIа*
	1—50	49,10	—	IIб*
	1—50	78,48	—	IIв*
	1—50	14,71	—	IIг*
	1—60	9,81	—	II
	1—60	19,60	—	III
	1—80	49,10	—	IV
	1—100	9,81	—	V
	1—100	19,60	—	Va*
	1—100	29,40	—	Vб*
	1—100	49,10	—	Vв*
	1—200	19,60	—	VIa*
	1—200	49,10	—	VI
	1—200	98,10	—	VII
	1—200	245,00	—	VIIa*
	1—600	49,10	—	VIII
	1—600	98,10	—	IX
	1—1000	98,1	—	X
	1—2000	49,1	—	XI
	1—2000	98,1	—	XII
	1—2000	14,7	—	XIII
	1—2000	196,0	—	XIV
	1—3000	196,0	—	XV
	1—5000	98,1	—	XVI
	1—5000	196,0	—	XVII
	1—5000	294,0	—	XVIII
	1—5000	392,0	—	XIX
	100—5000	394,4	—	XX
Ударные нагрузки:				
многократные	—	29,40	2—20	Iа*
	—	78,48	2—15	Iб*
	—	147,00	2—15	I
	—	392,00	2—10	II
	—	735,00	2—6	III
	—	1471,00	1—3	IV
одиночные	—	29,4	2—20	Iа*
	—	39,2	4—60	I
	—	196,0	20—50	II
	—	735,0	2—6	III
	—	1471,0	1—3	IV
	—	4905,0	1—2	V
	—	9810,0	0,2—1,0	VI
	—	14710,0	0,2—0,5	VII
	—	29400,0	0,2—0,5	VIII
Линейные (центробежные) нагрузки	—	98,1	—	I
	—	245,0	—	II
	—	491,0	—	III
	—	981,0	—	IV
	—	1471,0	—	V
	—	1962,0	—	VI
	—	4905,0	—	VII

* Дополнительные степени жесткости к ГОСТ 16962-71, применяемые для электротехнических изделий народнохозяйственного и бытового назначения.

ческие (постоянной емкости и подстроечные с дискретным регулированием значения емкости) высокой и промышленной частоты (f=50 Гц); фильтровые; измерительные; импульсные, или накопительные; для пуска и работы электродвигателей (пусковые и рабочие конденсаторы) переменного тока; для силовой полупроводниковой техники (коммутирующие, демпфирующие, фильтровые, компенсирующие).

По ***роду напряжения*** различают конденсаторы, предназначенные для работы на переменном напряжении (синусоидальной и несинусоидальной формы) промышленной и повышенной частоты; при пульсирующем напряжении; в импульсных режимах.

По ***конструктивному исполнению*** выделяют конденсаторы с бумажным, пленочным и комбинированным диэлектриком; металлизированными и фольговыми (скрытыми и выступающими) обкладками; с встроенными плавкими предохранителями и без предохранителей; с корпусом, находящимся под рабочим напряжением и с изолированным корпусом; с металлическими и неметаллическими корпусами прямоугольной и цилиндрической формы; однофазные и трехфазные.

По ***условиям охлаждения*** различают конденсаторы с естественным и принудительным воздушным и жидкостным охлаждением.

Конденсаторы для электронных и радиотехнических устройств классифицируются в соответствии с ОСТ 11.074.008-78 (рис. 1.3.1).

Деление конденсаторов по типу диэлектрика приведено в табл. 1.4.1 (§ 1.4).

По ***признаку управляемости*** значением емкости различают конденсаторы постоянной и переменной емкости, а по ***характеру управления***—с механическим и электрическим управлением значением емкости. Конденсаторы с механическим управлением значения емкости подразделяются на конденсаторы с плавным и дискретным (ступенчатым) характером регулирования значения емкости.

Конденсаторы переменной емкости с механическим управлением по типу диэлектрика делятся на конденсаторы вакуумные, с газообразным (воздушные, газонаполненные), жидким и твердым (керамические, стеклянные, пленочные) диэлектриком; с электрическим управлением — на сегнетокерамические (вариконды) и полупроводниковые (варикапы).

По ***типу обкладок*** различают конденсаторы с пластинчатыми, фольговыми, металлизированными, комбинированными (фольговые + металлизированные) обкладками.

По ***назначению*** бывают конденсаторы широкого применения и специальные (измерительные, для делителей напряжения, связи, блокировочные, разделительные, контурные, дозиметрические и т. д.).

По ***значению номинального напряжения*** различают конденсаторы низкого и высокого напряжения.

Конденсаторы с номинальным действующим значением переменного напряже-

ния $U_н \leqslant 1000$ В, а также с номинальным значением напряжения постоянного тока $U_н \leqslant 1600$ В относят к группе конденсаторов низкого напряжения. Конденсаторы с бо́льшими значениями номинального напряжения относят к группе высокого напряжения. Для конденсаторов с оксидным диэлектриком под термином «низкое» понимают напряжение в несколько десятков вольт, поскольку наибольшее номинальное напряжение в силу особенностей конденсаторов этого типа ие превышает 600 В.

Конденсаторы для электронных и радиотехнических устройств делятся на конденсаторы с малыми ($\operatorname{tg}\delta < 0{,}008$ на частоте и при температуре, оговоренных в технических условиях) и большими ($\operatorname{tg}\delta \geqslant 0{,}008$) потерями энергии.

Различают также конденсаторы с высокой (изменение емкости не превышает десятые доли процента в рабочем диапазоне по частоте и температуре) и низкой температурно-частотной стабильностью емкости.

Для классификации конденсаторов могут быть использованы и другие дополнительные признаки, например, такие как исполнение, вид охлаждения, внешнее оформление, электрический режим работы, габарит (малогабаритные и большого габарита) и т. д.

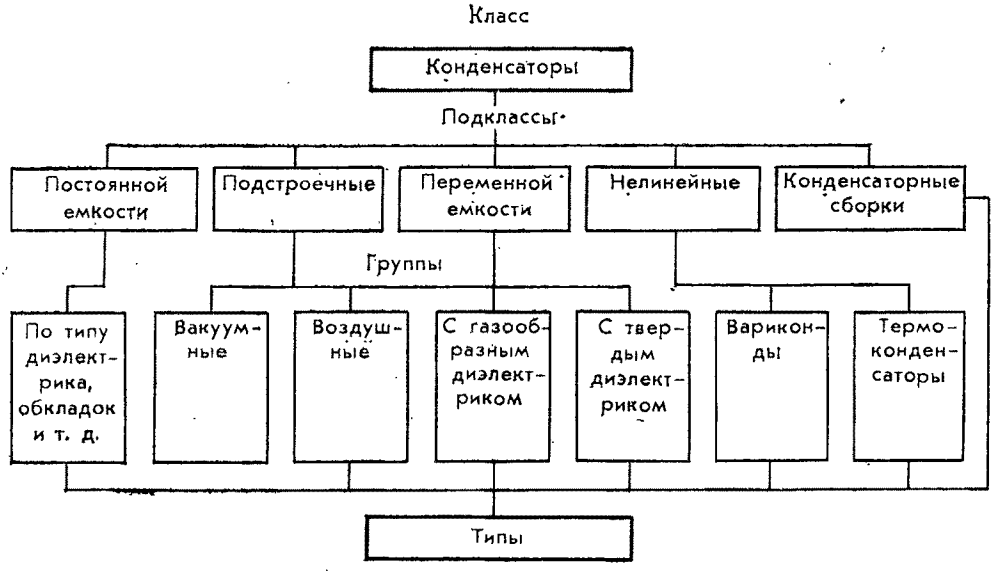


Рис. 1.3.1. Схема классификации конденсаторов электронной техники (ОСТ 11074.008-78)

§ 1.4. Система обозначения конденсаторов

Каждому типу и конденсатору присваивается условное обозначение. Система условных обозначений должна наиболее полно раскрывать конструктивные особенности, области применения, давать сведения о функциональном назначении, основных технических параметрах, условиях эксплуатации конденсаторов. Использование условной системы обозначений позволяет легко ориентироваться во множестве выпускаемых номиналов конденсаторов и выбрать подходящий по техническим параметрам и условиям эксплуатации.

Обозначения силовых конденсаторов и конденсаторных установок

Различают сокращенное и полное условные обозначения конденсаторов. ***Сокращенное*** условное обозначение силовых конденсаторов состоит из букв или из букв и цифр.

Первая буква обозначает функциональное назначение: К — для повышения коэффициента мощности электроустановок переменного тока частоты 50 и 60 Гц (косинусные), И — импульсный, Ф — фильтровый, С — связи, Д — демпфирующий или для делителей напряжения, О — отбора мощности, П — полупроводниковых преобразователей, Г — гасящий для систем тиристорного электропривода, Э — электротермический, Р — регулирующий, Л — для люминесцентных светильников;

вторая буква обозначает род пропитки: С — синтетическая жидкость, М — нефтяное масло, К — касторовое масло или назначение (О — для отбора мощности);

третья буква указывает на область конкретного применения или режим работы: Г — в схемах с электрогидравлическим эффектом, И — для измерительных целей, Н — накопительный, Т — в схемах тиристорного электропривода или на тяговых подстанциях, Э — для электротермических установок промышленной частоты; на конструктивную особенность: В — с водяным охлаждением, К — с комбинированным диэлектриком, П — пленочным диэлектриком, М — в металлическом корпусе, пропитка маслом или малоиндуктивный конденсатор, Р — с расширителем или буква Б, обозначающая категорию электрообо-

рудования по длине пути утечки внешней изоляции (см. ГОСТ 9920-75). Буква П указывает, что конденсатор для делителей напряжения совмещен с изолирующей подставкой;

четвертая буква указывает на особенность монтажа: У — допускается установка конденсатора под углом до 30° от вертикали, на категорию по длине пути утечки внешней изоляции (см. ГОСТ 9920-75), вид охлаждения (О — принудительно-воздушное), тип диэлектрика (К — комбинированный) или уточняет назначение конденсатора (П — подстроечный);

первая цифра после букв обозначает габарит конденсатора (0 — нулевой, 1 — первый, 2 — второй).

Система полного условного обозначения для силовых конденсаторов приведена на

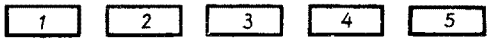


Рис. 1.4.1. Структура типового обозначения силовых конденсаторов и конденсаторных установок. *1—5* — номера элементов

рис. 1.4.1, где первый элемент (1) — сокращенное условное обозначение; второй (2) — номинальное напряжение, кВ; третий (3) — значение номинальной реактивной мощности (квар) или емкости (нФ, мкФ) или другие технические параметры, например, номинальная частота; четвертый (4) — цифрами обозначается количество изолированных выводов, буквами — исполнение и цифрами после букв — категория размещения; пятый (5) — номер документа, по которому осуществляется поставка.

Примеры обозначения

Сокращенное условное обозначение. Конденсаторы для повышения коэффициента мощности электроустановок переменного тока частоты 50 и 60 Гц(К), с синтетической пропиткой (С), первого (КС1) габарита: **конденсатор КС1.**

Полное условное обозначение. Конденсатор косинусный с синтетической пропиткой первого габарита, номинальным напряжением 6,3 кВ, мощностью 30 квар, однофазного исполнения с двумя изолированными выводами, климатического исполнения У, 3-й категории для верхнего значения температуры окружающего воздуха 40°С, поставляемого по ГОСТ 1282-79: **конденсатор КСТ-6,3-30-2УЗ, температура 40°С, ГОСТ 1282-79.**

Конденсаторные установки имеют аналогичную с силовыми конденсаторами структуру условного обозначения.

Сокращенное условное обозначение содержит следующие элементы: *первая буква* У — установка; *вторая буква* К — конденсаторная; *третья* — указывает на конструктивную особенность (А — с автоматическим выключателем, Б — бесшкафная, С — столбовая, Л — левое исполнение ячейки ввода, П — правое исполнение ячейки ввода); *четвертая* — обозначает способ регулирования (Н — по напряжению, Т — по току); *цифра* указывает на количество конденсаторов, включенных самостоятельно.

Структура полного условного обозначения для конденсаторных установок показана на рис. 1.4.1, где *первый элемент* (1) — сокращенное условное обозначение; *второй (2)* — номинальное напряжение, кВ; *третий* (3) — номинальная мощность, квар; *четвертый* (4) — буквами указывает на особенность конструкции и способ регулирования [Л(П) — левое(правое) исполнение ячейки ввода, Н — регулирование по напряжению, Р — с командным блоком и приставкой автоматического регулятора «Аркон»], далее буквами — исполнение, цифрами после букв — категория размещения. Для некоторых установок перед буквой, обозначающей исполнение, цифрами указывается количество конденсаторов в установке; *пятый* (5) — номер документа, по которому осуществляется поставка. Обозначения некоторых выпускаемых конденсаторных установок незначительно отличаются от изложенной схемы.

Примеры сокращенного условного обозначения. 1. Установка конденсаторная модернизированная — УКМ.

2. Установка конденсаторная бесшкафная с регулированием по напряжению — УКБН; по току — УКБТ.

Пример полного условного обозначения. Установка конденсаторная на номинальное напряжение 0,38 кВ мощностью 150 квар с регулированием по напряжению, климатическое исполнение У, категория 3, поставляемая по ТУ 16-527.163-71: **установка конденсаторная УК-0,38-150 НУЗ ТУ 16-527.163-71.**

Обозначение конденсаторов для электронных и радиотехнических устройств

Обозначение конденсаторов электронной техники производится в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 11.074.008-78 и ГОСТ 11076-69

Сокращенное условное обозначение конденсатора состоит из следующих элементов:

первый элемент — буква или сочетание букв, обозначающих подкласс конденсатора (К — постоянной емкости, КТ — подстроечные, КП — переменной емкости, КС — конденсаторные сборки); *второй* — цифровое обозначение конденсаторов соответствующей группы;

третий — порядковый номер разработки конкретного типа, в состав которого в технически обоснованных случаях может входить и буквенное обозначение. Между вторым и третьим элементами в условном обозначении ставится дефис.

В табл. 1.4.1 приведены классификации конденсаторов по типу диэлектрика и первые два элемента их сокращенного условного обозначения.

Полное условное обозначение состоит из следующих элементов:

первый элемент — сокращенное обозначение;

второй — значения основных параметров и характеристик, необходимых для заказа и записи в конструкторской докумен-

Таблица 1.4.1

Классификация конденсаторов по виду диэлектрика	Сокращенное обозначение	Прежнее обозначение групп конденсаторов
Керамические на номинальное напряжение ниже 1600 В	К10	КМК, КЛГ, КЛС, КМ, КП, КПС, КД, КДУ, КТ, КТБ, КТН, КТП, КО, КДО, КМ-С
Керамические на номинальное напряжение 1600 В и выше	К15	КВИ, КВЦ
Стеклянные	К21	—
Стеклокерамические	К22	СКМ, СКМ-Т
Тонкопленочные с неорганическим диэлектриком	К26	—
Слюдяные малой мощности	К31	КСГ, КСО, СГМ, СГО, СГО-С, ОСГ
Слюдяные большой мощности	К32	—
Бумажные фольговые на номинальное напряжение ниже 2000 В	К40	КБП, ОКБП, ОПБТ, КБПС-Ф
Бумажные фольговые на номинальное напряжение 2000 В и выше	К41	—
Бумажные металлизированные	К42	МБГВ, МБГИ, МБГО, МБГТ, МБГЧ, МБМ
Оксидно-электролитические алюминиевые	К50	—
Оксидно-электролитические танталовые, ниобиевые и др.	К51	—
Объемно-пористые	К52	—
Оксидно-полупроводниковые	К53	—
С двойным электрическим слоем (ионисторы)	К58	—
Воздушные	К60	—
Вакуумные	К61	В, КВ, ВВ, ВМ
Полистирольные:		
с фольговыми обкладками	К70	ОППТ, ПМ
металлизированные	К71	—
Политетрафторэтиленовые (фторопластовые)	К72	ФГТИ, ФЧ
Полиэтилентерефталатные (лавсановые)	К73	—
С комбинированным диэлектриком	К75	ПКГИ, ПКГТ
Лакопленочные	К76	—
Поликарбонатные	К77	—
Полипропиленовые	К78	—

Таблица 1.4.2

Предел номинальной емкости	Значение номинальной емкости	Пример кодированного обозначения	Предел номинальной емкости	Кодированное обозначение единицы измерения
До 10 000 пФ	1 пФ	1П0	До 100 пФ	П
	1,5 пФ	1П5		
	15 пФ	15П		
	15,2 пФ	15П2		
	100 пФ	Н10	От 0,1 до 100 пФ	Н
	150 пФ	Н15		
	1000 пФ	1Н0		
	1520 пФ	1Н52		
От 0,01 и выше мкФ	0,01 мкФ	10Н		
	0,015 мкФ	15Н		
	0,047 мкФ	47Н		
	0,1 мкФ	М10	От 0,1 и выше мкФ	М
	0,15 мкФ	М15		
	1 мкФ	1М0		
	1,5 мкФ	1М5		
	15 мкФ	15М		
	150 мкФ	150М		

тации (вариант конструктивного исполнения, номинальное напряжение, номинальная емкость, допускаемое отклонение емкости, группа и класс по температурной стабильности, реактивная мощность, другие необходимые дополнительные характеристики);

третий — обозначение климатического исполнения (только для конденсаторов ис-

Таблица 1.4.3

Допускаемое отклонение емкости, %	Кодированное обозначение	Допускаемое отклонение емкости, %	Кодированное обозначение
±0,1	Ж	+30	Ф
±0,2	У	+50	
		—10	Э
±0,5	Д	+50	
		—20	Б
±1	Р	+80	
		—20	А
±2	Л	+100	
		—	Я
±5	И	+100	
		—10	Ю
±10	С	±0,4 пФ	Х
±20	В		

Таблица 1.4.4

Типы конденсаторов	Нормированное значение ТКЕ и допуск (для класса Б) по ТКЕ, $10^{-6} \cdot К^{-1}$	Интервал температур нормированного значения ТКЕ, °С	Условное обозначение ТКЕ		
			буквами и цифрами	цветным кодом	
				покрытие конденсатора	кодировочный знак
Керамические, стеклянные	+(100±40)	20—70	П100	Синий	Без знака
	+(60±40)		П60	Серый	Красный
	+(33±30)		П33	»	Без знака
	0±30		МПО	Голубой	Черный
	—(33±30)		М33	»	Коричневый
	—(47±40)		М47	»	Без знака
	—(75±40)		М75	»	Красный
	—(150±40)		М150	Красный	Оранжевый
	—(220±40)		М220	»	Желтый
	—(330±60)		М330	»	Зеленый
	—(470±90)		М470	»	Синий
	—(750±120)		М750	»	Без знака
	—(1500±250)		М1500	Зеленый	То же
	—(700±120)		М700	Красный	» »
	—(1300±250)		М1300	Зеленый	» »
	—(2200±500)		М2200	»	Серый
Стеклокерамические	0±30	30—70	МПО	—	—
	—(47±30)		М47	—	—
	—(330±100)		М330	—	—
Стеклоэмалевые КС	+(60±40)	20—85	П60	—	—
	0±30		МПО	—	—
	—(47±30)		М47	—	—
	$-\left(150\pm\frac{40}{70}\right)$		М150	—	—
ДС	±50	-60÷(+100)	—	—	—

полнения В и Т). Обозначение исполнения У, ХЛ не указывается;

четвертый — обозначение документа на поставку (номер ТУ, ГОСТ, ОЖО и т. д.).

Для обозначения номинальной емкости, группы и класса по температурной стабильности малогабаритных конденсаторов применяются кодированные обозначения. Они состоят из (ГОСТ 11076-69):

— цифры, обозначающей значение номинальной емкости;

— буквы, указывающей на единицу измерения емкости и одновременно положение запятой десятичной дроби;

— буквы, обозначающей допускаемое отклонение емкости.

Указанные обозначения должны наноситься без интервалов. Порядок обозначения номинальных емкостей с помощью кода (ГОСТ 11076-69) приведен в табл. 1.4.2, а допускаемых отклонений — в табл. 1.4.3. Для обозначения группы и класса по температурной стабильности малогабаритных конденсаторов применяются буквы и цифры или цветной код.

В табл. 1.4.4 и 1.4.5 даются условные обозначения при помощи букв и цифр и цветного кода группы по температурной стабильности емкости малогабаритных конденсаторов электронных и радиотехнических устройств.

Для конденсаторов с нормированным значением температурного коэффициента емкости (ТКЕ) буквы обозначают знак (М — минус, П — плюс, МП — близкое к нулю), а цифры — значение ТКЕ (см. § 4.1). Наличие буквы Н в условном обозначении группы по температурной стабильности (см. табл. 1.4.5) указывает на то, что для этих конденсаторов значение ТКЕ не нормируется, а цифры, следующие после буквы Н, указывают на предельно допустимые изменения емкости в интервале рабочих температур в процентах, относительно измеренной при 20°С.

При использовании цветного кода цвет покрытия корпуса малогабаритных конденсаторов указывает на знак ТКЕ, а цвет кодировочного знака — значение ТКЕ (см. табл. 1.4.4 и 1.4.5).

Пример сокращенного условного обозначения конденсаторов. Конденсатор постоянной емкости с комбинированным

Таблица 1.4.5

Допускаемое изменение емкости в интервале рабочих температур относительно емкости, измеренной при 20° С, % не более	Условное обозначение		
	буквами и цифрами	цветным кодом	
		покрытие конденсатора	кодировочный знак
±10	Н10	Оранжевое	Черный
±20	Н20	»	Красный
±30	Н30	»	Зеленый
±50	Н50	»	Синий
±70	Н70	»	Без знака
±90	Н90	»	Белый

диэлектриком, номер разработки данного типа двадцать девятый, вариант исполнения А: **К75-29А.**

Пример полного условного обозначения. Конденсатор керамический **К10-25,** номинальная емкость 100 пФ с допускаемым отклонением ±10%, группа по температурной стабильности М47, с отсутствием «мерцания емкости» (НМ), всеклиматического исполнения (В), поставляемого по ОЖО.460.106 ТУ: **К10-25-100 пФ ±10% -М47-НМ-В ОЖО 460.106 ТУ.**

Пример кодированного обозначения емкости. Конденсатор емкостью 33 пФ и допускаемым отклонением ±5%: **33П.И.**

§ 1.5. ГОСТы и ОСТы по тематике справочника

Общие сведения

ГОСТ 19880-74. Электротехника. Основные понятия. Термины и определения

ГОСТ 1494-77. Электротехника. Буквенные обозначения основных величин

ГОСТ 21515-76. Материалы диэлектрические. Термины и определения

ГОСТ 22372-77. Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 до $5 \cdot 10^6$ Гц

ОСТ 16.0 686.602-77 ОЕСТПП. Материалы электроизоляционные. Термины

ОСТ 11.074.008-78. Конденсаторы. Классификация и система условных обозначений

ГОСТ 11076-69. Конденсаторы и резисторы. Обозначения величин емкости и сопротивления

ГОСТ 21415-75. Конденсаторы постоянной емкости. Термины и определения

ГОСТ 2519-67. Конденсаторы электрические. Ряды номинальных емкостей

ГОСТ 9661-73. Конденсаторы постоянной емкости. Допускаемые отклонения величины емкости от номинальной

ГОСТ 14611-78. Конденсаторы постоянной и переменной емкости вакуумные. Ряды номинальных емкостей, напряжений, токов

ГОСТ 23520-79. Конденсаторы подстроечные керамические. Ряды номинальных емкостей

ГОСТ 9665-77. Конденсаторы постоянной емкости. Ряды номинальных напряжений

ГОСТ 12661-67. Конденсаторы и резисторы электрические. Длины монтажные и диаметры проволочных выводов

Условия применения. Испытания конденсаторов. Измерения параметров

ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды

ГОСТ 15543-70. Изделия электротехнические. Исполнения для различных климатических районов. Общие технические требования в части воздействия климатических факторов внешней среды

ГОСТ 17516-72. Изделия электротехнические. Условия эксплуатации в части воздействия механических факторов внешней среды

ГОСТ 4401-73. Стандартная атмосфера. Параметры

ГОСТ 21322-75Е. Изделия электронной техники для устройств широкого применения. Механические и климатические воздействия. Классификация по условиям применения

ГОСТ 2.117-71. Согласование применения покупных изделий

ОСТ 11.074.011-79. Конденсаторы. Руководство по применению

ГОСТ 21395.0-75. Резисторы и конденсаторы. Методы проверки требований и конструкций. Общие положения

ГОСТ 21395.2-75. Резисторы и конденсаторы. Методы проверки герметичности и уплотнения

ОСТ 16.0.686.569-77. ОЕСТПП. Конденсаторы силовые. Контроль и испытания. Термины и определения

ГОСТ 21315.0-75. Конденсаторы. Методы измерения электрических параметров. Общие положения

ГОСТ 21315.1-75. Конденсаторы. Методы измерения емкости и тангенса угла потерь

ГОСТ 21315.2-75. Конденсаторы. Методы измерения электрического сопротивления изоляции

ГОСТ 21315.3-75. Конденсаторы. Метод измерения тока утечки

ГОСТ 21315.4-75. Конденсаторы. Метод проверки электрической прочности

ГОСТ 21315.5-75. Конденсаторы. Метод определения температурного коэффициента емкости

ГОСТ 21315.6-75. Конденсаторы. Метод определения температуры перегрева при нагрузке допустимой реактивной мощностью и допустимым высокочастотным током

ГОСТ 21315.7-75. Конденсаторы. Методы определения отсутствия мерцания емкости

ГОСТ 21315.8-75. Конденсаторы. Методы измерения собственной индуктивности

ГОСТ 21317.9-75. Конденсаторы. Метод измерения полного электрического сопротивления

ГОСТ 21315.10-75. Конденсаторы. Метод испытания перенапряжением

ГОСТ 5479-70. Проверка конденсаторов на повышенное атмосферное давление

ГОСТ 6962-75. Методы испытаний конденсаторов

Надежность

ГОСТ 13377-75. Надежность в технике. Термины и определения

ГОСТ 13216-67. Надежность. Общие технические требования и методы испытаний

ГОСТ 19460-74. Надежность в технике. Расчет показателей безотказности невосстанавливаемых объектов (без резервирования).

ГОСТ 21493-76. Изделия электронной техники производственно-технического назначения и народного потребления. Требования к сохраняемости и методы испытаний

Силовые конденсаторы

ГОСТ 1282-80Е. Конденсаторы для повышения коэффициента мощности электроустановок переменного тока частотой 50 и 60 Гц

ГОСТ 15581-70. Конденсаторы для емкостной связи, отбора мощности и измерения напряжения в фарфоровых корпусах

ГОСТ 18689-73. Конденсаторы для электротермических установок на частоту от 0,5 до 10,0 кГц

Конденсаторы для электронных и радиотехнических устройств

ГОСТ 5.621-77. Конденсаторы керамические типа К10-7В. Технические условия. Требования к качеству аттестованной продукции

ГОСТ 7159-79Е. Конденсаторы керамические типа КД-1. Технические условия

ГОСТ 7160-78Е. Конденсаторы керамические высоковольтные типов К15У-1, К15У-2, К15У-3

ГОСТ 23898-79Е. Конденсаторы керамические типа К10П. Технические условия

ГОСТ 23860-79Е. Конденсаторы керамические трубчатые типа КТИ. Технические условия

ГОСТ 23390-78Е. Конденсаторы керамические дисковые типов КД-2, КДУ. Технические условия

ГОСТ 23385-78Е. Конденсаторы керамические типа КТ. Технические условия

ГОСТ 11553-80Е. Конденсаторы керамические проходные и опорные на напряжение до 750 В

ГОСТ 10069-70. Конденсаторы стеклоэмалевые типа КС

ГОСТ 23232-78Е. Конденсаторы металлобумажные малогабаритные типа МБМ. Технические условия

ГОСТ 5.887-77Е. Конденсаторы металлобумажные МБГЧ-1. Технические условия. Требования к качеству аттестованной продукции

ГОСТ 5629-75. Конденсаторы бумажные типа К41-1 на напряжения от 2,5 до 40 кВ

ГОСТ 6118-78. Конденсаторы бумажные герметичные типа КБГ. Технические условия

ГОСТ 6760-76. Конденсаторы бумажные проходные типа КБП. Технические условия

ГОСТ 7112-74. Конденсаторы металлобумажные МБГ

ГОСТ 9687-73. Конденсаторы бумажные видов БМ-2 и БМТ-2

ГОСТ 5477-70. Конденсаторы бумажные К40-14. Требования к качеству аттестованной продукции

ГОСТ 10783-79. Конденсаторы пленочные полистирольные ПО, ПОВ, ПМ

ГОСТ 5.1400-72. Конденсаторы металлопленочные К73-5. Требования к качеству аттестованной продукции

ГОСТ 5.1708-72. Конденсаторы пленочные малогабаритные ПМ-2. Требования к качеству аттестованной продукции

ГОСТ 5.1967-73. Конденсаторы комбинированные К75-11. Требования к качеству аттестованной продукции

ГОСТ 19764-74. Конденсаторы переменной емкости с воздушным диэлектриком. Общие технические условия

ГОСТ 19763-74. Конденсаторы переменной емкости с пленочным диэлектриком. Общие технические условия

ГОСТ 5.231-69. Конденсаторы электролитические К50-13. Требования к качеству аттестованной продукции

Глава 2. Физические явления в электрических конденсаторах

§ 2.1. Поляризация диэлектрика

Диэлектрики — вещества, основным электрическим свойством которых является способность поляризоваться в электрическом поле.

Диэлектрические материалы поляризуются в силу особенностей строения их вещества, а также благодаря низкой удельной электрической проводимости (ниже 10^{-3} См/м). При воздействии электрического поля на диэлектрик имеющиеся в нем связанные электрические заряды (электроны, ионы или другие более крупные заряженные частицы) смещаются, деформируются или поворачиваются под влиянием действующих на них кулоновских сил и других сил взаимодействия частиц друг с другом. Возникает *индуцированная поляризация* — состояние вещества, при котором центры масс положительных и отрицательных зарядов смещены относительно друг друга.

Процесс поляризации протекает на фоне тепловых колебаний и более сложных взаимодействий атомов, ионов и молекул, имеющих место, например, в кристаллах. Поляризация обуславливает такие важные свойства конденсатора, как увеличение его емкости при введении диэлектрика в электрическое поле между обкладками за счет связывания зарядов на поверхности обкладок и диэлектрика и увеличение плотности зарядов. С ней же связано возникновение дополнительной (поляризационной) составляющей тока смещения при изменении модуля или направления вектора напряженности электрического поля, нагрев диэлектрика вследствие рассеяния энергии при смещении зарядов.

Интенсивность явления поляризации характеризуется *вектором поляризованности*

$$\vec{P} = \lim_{V \to 0} \frac{\Sigma_i q_i \vec{l}_i}{V},$$

где l_i — расстояния, на которые смещаются заряды q_i в объеме V. Для большинства диэлектриков поляризованность прямо пропорциональна напряженности электрического поля, и способность вещества поляризоваться характеризуется *диэлектрической восприимчивостью*

$$\chi = P/\varepsilon_0 E,$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ $\frac{\Phi}{M}$ — электрическая постоянная.

На практике для характеристики способности диэлектрика к поляризации чаще используется *относительная диэлектрическая проницаемость*

$$\varepsilon_r = 1 + \chi.$$

Эту величину можно определить как отношение заряда q, имеющегося при некотором напряжении на обкладках конденсатора, содержащего диэлектрик, к заряду q_0, который был бы в том же конденсаторе и при таком же напряжении U, если бы между обкладками находился вакуум:

$$\varepsilon_r = q/q_0 = \frac{CU}{C_0 U} = \frac{C}{C_0}.$$

Здесь C и C_0 — значение емкости конденсатора с диэлектриком и без него, т. е. относительная диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз изменится емкость конденсатора при замещении в нем вакуума на диэлектрик. Для вакуума $\chi = 0$ и $\varepsilon_r = 1$.

Относительная диэлектрическая проницаемость может быть также определена как отношение

$$\varepsilon_r = E_0/E,$$

где E_0 — напряженность поля между обкладками в отсутствие диэлектрика ($E_0 = U/d$, d — расстояние между обкладками), т. е. когда между обкладками находится вакуум; E — напряженность поля в диэлектрике при помещении его между обкладками при одном и том же заряде q, т. е. при отключенном источнике напряжения.

При наличии между обкладками диэлектрика в результате поляризации возникают поверхностные связанные заряды, плотность которых $\sigma = P$, и обусловленное ими поле с напряженностью $E_\sigma = \sigma/\varepsilon_0$, направленное навстречу внешнему полю (рис. 2.1.1). Поэтому результирующее поле внутри диэлектрика ослабляется:

$$E = E_0 - E_\sigma.$$

При подключенном источнике напряжения значение E при внесении между обкладками и удалении диэлектрика постоянно, зато изменяется заряд q за счет протекания тока от источника.

После прекращения действия внешнего электрического поля на диэлектрик в нем сохраняется электрическая поляризация, называемая *остаточной*.

В зависимости от характера связей между заряженными частицами диэлектрика и механизма смещения этих частиц различают несколько видов поляризации. Слеd

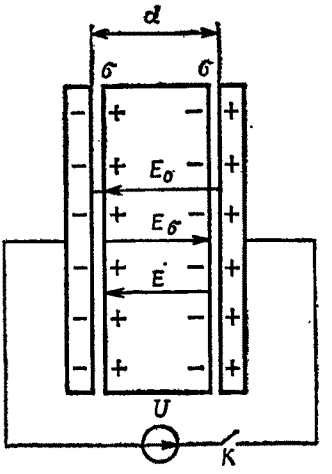


Рис. 2.1.1. Электрические поля при поляризации диэлектрика. К — ключ, подключающий источник напряжения U

дует выделить две основные группы: *упругие* и *релаксационные* [2.1—2.3]. В упругих видах поляризации участвуют сильно связанные частицы вещества, смещающиеся на относительно небольшие расстояния. Смещение происходит практически мгновенно, без потерь энергии.

Релаксационные виды поляризации представляют собой процесс установления квазиравновесного состояния слабо связанных частиц, изменяющих свое положение под влиянием теплового движения и смещающихся на бо́льшие, чем при упругой поляризации, расстояния. Релаксационные виды поляризации замедленные и сопровождаются потерями энергии. При этом потери энергии (преобразование энергии электрического поля, создаваемого источником, в тепловую энергию) возникают не только в процессе поляризации, но и при деполяризации — процессе устранения остаточной поляризации.

Упругие виды поляризации. *Электронная поляризация* наблюдается во всех диэлектриках и представляет собой упругое смещение центра масс электронного облака атомов и ионов относительно положения в отсутствие электрического поля. При этом образуются индуцированные диполи (пространственно-разделенные пары электрических зарядов), обладающие моментом $\vec{ql}$.

Атомная поляризация возникает вследствие смещения в электрическом поле друг относительно друга разнородных атомов, имеющих общие электронные оболочки.

Таблица 2.1.1

Представители групп диэлектриков и основные виды поляризации	$T=20°$ С	$f=10^6$ Гц
	ε_r	$10^4 \cdot \operatorname{tg}\delta$
Неполярные диэлектрики		
Электронная и атомная поляризации		
Газообразные вещества:		
азот	1,0006	0,01
Жидкие вещества:		
нефтяное масло	2,1—2,2	1—2
вазелин	2,1—2,2	2—3
полиизобутилен (октол)	2,2—2,3	0,5—1,0
полисилоксан	2,3—2,7	2—5
Твердые вещества в кристаллическом и аморфном состоянии:		
парафин	2,1—2,2	3—7
цезерин	2,2—2,5	3—5
полиэтилен	2,1—2,4	1—2
полистирол	2,5—2,6	1—2
полипропилен	2,2—2,3	1—3
политетрафторэтилен (фторопласт-4)	2,0—2,2	0,5—1,0
Полярные диэлектрики		
Релаксационная, электронная, атомная поляризации		
Жидкие вещества:		
касторовое масло	4,2—4,7	10—15
трихлордифенил	5,9	5—10
пирален-1500	6,3	5—10
тетрахлорэтиленбензол	4,2	5—10
Твердые вещества в кристаллическом и аморфном состоянии:		
поликарбонат	2,8—3,0	7—10
полиэтилентерефталат (лавсан)	3,0—3,4	40—100
эпоксидные смолы	3,5	50—80
целлюлоза	6,6	60—100
бумага кондейсаторная	2—3	10—30
Ионные диэлектрики с плотной упаковкой ионов		
Упругая ионная и электронная поляризации		
Твердые неорганические вещества:		
рутил (TiO_2)	100—150	5—10
кварц (SiO_2)	4,2	2—3
слюда мусковит	6,5—7,0	1,0—1,5
Ионные диэлектрики с неплотной упаковкой ионов		
Упругая и релаксационная, ионная и электронная поляризации		
Твердые неорганические вещества:		
неорганические стекла	3—12	4—12 ($f=10^6$ Гц)
высокочастотная керамика	7—150	1—5 ($f=10^6$ Гц)
низкочастотная керамика с низким содержанием сегнетоэлектриков, в частности, твердый раствор титаната, висмута и стронция	$(0{,}9—1{,}0)\cdot10^3$	10—20
Сегнетоэлектрики		
Доменная поляризация		
Твердые неорганические вещества:		
низкочастотная керамика с высоким содержанием сегнетоэлектриков, в частности, твердые растворы титанатов бария, строиция, двуокиси церия, кальция	$(1{,}3—10{,}0)\cdot10^3$	$(1—3)\cdot10^2$
керамика для варикондов	$(0{,}6—10{,}0)\cdot10^4$	$(1—10)\cdot10^2$

Ионная поляризация — частный случай атомной — возникает при смещении относительно центров упругосвязанных ионов, образующих кристаллическую решетку.

Дипольная упругая поляризация наблюдается в молекулярных кристаллах, в которых полярные молекулы (молекулы-диполи), упруго связанные в решетке и не изменяющие своих равновесных ориентаций под влиянием тепловых колебаний, под действием электрического поля поворачиваются на некоторый угол. Такой характер, например, имеет поляризация полимеров при достаточно низких температурах.

Вследствие малых масс частиц, участвующих в поляризации, и незначительных их смещений перечисленные выше упругие виды поляризации при скачкообразном изменении напряженности поля устанавливаются за время 10^{-12}—10^{-16} с. В связи с малым временем установления и учитывая диапазон частот, в котором используются в технике конденсаторы, упругие виды поляризации можно считать происходящими мгновенно.

Релаксационные виды поляризации. Характер протекания релаксационных (замедленных) видов поляризации также тесно связан со строением веществ, но главное их отличие заключается в том, что частицы, принимающие в них участие, могут изменять свои равновесные состояния при тепловых колебаниях.

Дипольная релаксационная поляризация наблюдается в веществах с полярными молекулами (молекулами, имеющими несовпадающие центры масс положительно и отрицательно заряженных частиц), обладающих электрическим моментом даже в отсутствие внешнего электрического поля.

Такие диполи, находящиеся в хаотическом тепловом движении, под воздействием электрического поля частично растягиваются, поворачиваются, ориентируясь преимущественно в направлении поля, преодолевая некоторое сопротивление находящихся в тепловом движении частиц. Последнее приводит к необратимому преобразованию энергии — нагреву диэлектрика. В зависимости от плотности диэлектрика, его агрегатного состояния, вязкости, размеров молекул, температуры и других факторов ориентируются сами молекулы или достаточно большие группировки атомов либо радикалы. В соответствии с этим различают *дипольно-групповую* и *дипольно-радикальную поляризации,* характерные, например, для аморфных полимеров при температурах ниже температуры стеклования, когда вязкость достаточно велика [В.44].

При высокоэластичном состоянии (температура выше температуры стеклования), кроме этих видов поляризации, усиливается *дипольно-сегментальная* поляризация, при которой под влиянием поля ориентируются крупные сегменты молекул, обладающие электрическим моментом. Благодаря бо́льшей подвижности молекул жидких веществ их диэлектрическая проницаемость, обусловленная дипольной поляризацией, существенно выше, чем у твердых веществ (табл. 2.1.1).

С ростом температуры за счет снижения сил вязкого трения дипольная поляризация облегчается, однако одновременно возрастает тепловое движение молекул и их частей, препятствующее упорядоченной ориентации диполей под действием электрического поля. Поэтому при дипольной поляризаци наблюдается температурный

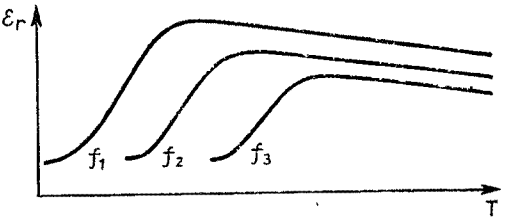


Рис. 2.1.2. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости от температуры для диэлектрика со значительной дипольной релаксационной поляризацией при разных частотах ($f_1 < f_2 < f_3$)

максимум диэлектрической проницаемости, положение которого из-за значительной инерционности частиц, участвующих в поляризации этого вида, и влияния температуры на вязкость жидких диэлектриков зависит от частоты (рис. 2.1.2).

Процесс установления такой поляризации во времени (также и деполяризации) при скачках значения напряженности электрического поля E имеет апериодический (экспоненциальный) характер и характеризуется *временем релаксации* τ (промежуток времени, в течение которого ориентированность диполей или поляризации изменяется в $e \approx 2{,}72$ раза).

Время релаксации дипольной поляризации большинства диэлектриков составляет 10^{-10}—10^{-2} с. При снятии электрического поля под влиянием тепловых колебаний произойдет релаксация (ослабление) ориентации диполей и соответственно снижение поляризованности до нуля за время (3—4) τ, т. е. за (3—4)·(10^{-10}—10^{-2}) с.

Ионная релаксационная поляризация обусловлена перебросами при тепловых колебаниях слабо связанных ионов преимущественно по направлению электрического поля. В результате этих избыточных перебросов такие ионы могут перемещаться на большие расстояния, превышающие постоянную решетки, а затем, попадая в глубокие потенциалы ямы, закрепляться. Асимметрия в распределении зарядов диэлектрика за счет таких ионов обуславливает увеличение электрического момента единицы объема и, следовательно, его поляризованность. После снятия поля вследствие теплового движения происходит постепенный возврат слабо связанных ионов к положениям равновесия, приводящим к симметрии распределения электрических зарядов, т. е. к нулевому электрическому моменту единицы объема.

Этот вид поляризации наблюдается в кристаллических веществах с неплотной упаковкой ионов, в неорганических стек-

лах. В зависимости от расстояний, на которые мигрируют слабо связанные ионы при ионно-релаксационной поляризации, время установления этого вида поляризации может изменяться в больших пределах и существенно превышать время установления упругой ионной поляризации. В результате преодоления сил сопротивления, проявляющихся при тепловых перебросах слабо связанных ионов, энергия электриче-

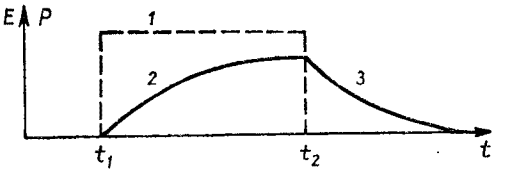


Рис. 2.1.3. Зависимость поляризованности P диэлектрика при процессах поляризации (*2*) и деполяризации (*3*) диэлектрика от времени в результате скачкообразного изменения напряженности внешнего электрического поля E (*1*) в момент t_1, его отключения и закорачивания обкладок в момент t_2

ского поля преобразуется в тепловую, ионно-релаксационная поляризация и деполяризация, как и остальные виды релаксационной поляризации, сопровождаются тепловыделением.

Электронная релаксационная поляризация, имеющая аналогичные ионно-релаксационной поляризации природу и характер, вызывается слабо связанными релаксирующими избыточными (дефектными) электронами. Наличие слабо связанных ионов и электронов обусловлено структурными дефектами в кристаллической решетке (пустыми узлами, собственными ионами между узлами, посторонними или примесными атомами в решетке и т. д.).

Следующий вид — *миграционная поляризация,* обусловленная перемещением (миграцией) свободных зарядов на значительные (макроскопические) расстояния в неоднородных диэлектриках.

Миграционная поляризация связана с перераспределением свободных зарядов в объеме диэлектрика и образованием макроскопических объемных зарядов. Под воздействием сил поля носители зарядов (электроны, ионы или более крупные заряженные частицы) мигрируют на значительные расстояния, а затем закрепляются, создавая объемные заряды. Эти заряды образуются либо на границе раздела слоев неоднородного диэлектрика, либо вблизи обкладок. Они могут накапливаться также в толще диэлектрика, например, в результате перемещения электронов или ионов в пределах отдельных проводящих или полупроводящих включений. Такие включения, приобретая дипольный момент, ведут себя подобно гигантским поляризованным молекулам.

Заряженные частицы могут перемещаться в толще прослоек жидкости, пропитывающей твердый диэлектрик. Причин закрепления носителей и образования объемных зарядов много — локальные дефекты кристаллической решетки, высокие потенциальные барьеры на границах диэлектрика различного рода и неоднородности, наличие микроскопических потенциальных ям и ряд других факторов, связанных в основном с дефектами структуры диэлектрика, и т. д.

Вследствие перемещения заряженных частиц на большие расстояния, а также из-за того, что в ряде случаев велика масса этих частиц, время релаксации упомянутых видов поляризации может быть достаточно большим — в пределах 10^{-8}—10^{8} с.

На световых частотах (10^{12}—10^{16} Гц) возникают *ионная и электронная резонансная поляризации,* сопровождающиеся резонансным поглощением энергии. (Для конденсаторов они нехарактерны.) На рис. 2.1.3 показаны качественные временные зависимости поляризации и деполяризации диэлектрика при скачкообразных изменениях напряженности электрического поля E, представляющих собой суммарный эффект от рассмотренных выше видов поляризации.

У твердых диэлектриков ионной структуры, относящихся к группе сегнетоэлектриков, наблюдается особый вид поляризации — *доменная.* У этих веществ имеются макроскопические области (домены), обладающие электрическими моментами в отсутствие внешнего поля. При воздействии поля домены (гигантские диполи) ориентируются преимущественно по полю, что обуславливает сильную поляризованность. Относительная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков достигает ста тысяч и более.

Особенностью доменной поляризации в отличие от других видов являются зависимость относительной диэлектрической проницаемости от напряженности поля и наличие участка насыщения, когда сориентированы все домены. Доменная поляризация сопровождается значительными потерями энергии и зависимость заряда от напряжения имеет вид петли гистерезиса.

Для сегнетоэлектриков при одновременном действии постоянного и переменного полей различают *реверсивную* (или обратимую) *диэлектрическую проницаемость* ε_p, характеризующую зависимость емкости нелинейного конденсатора на переменном токе от напряженности постоянной составляющей поля.

Кроме индуцированной поляризации в диэлектриках может иметь место *спонтанная поляризация,* возникающая самопроизвольно, без приложения электрического поля. Спонтанная поляризация присуща сегнетоэлектрикам.

Все конденсаторные диэлектрики в зависимости от их структуры и особенностей поляризации подразделяются на *неполярные,* имеющие электрически нейтральные молекулы, т. е. с совпадающими центрами масс положительно и отрицательно заряженных частиц, *полярные, ионные* и *сегнетоэлектрики.* В табл. 2.1.1 приведены сведения о таких диэлектриках и основных механизмах поляризации, наблюдающихся в них.

Для неполярных диэлектриков характерны слабые температурно-частотные зависимости ε_r и $\mathrm{tg}\delta$, тогда как у полярных они значительно сильнее (особенно для $\mathrm{tg}\delta$).

У ионных диэлектриков эти зависимости слабые при плотной упаковке ионов и умеренные — при неплотной упаковке. Наиболее значительны температурно-частотные зависимости ε_r и $\mathrm{tg}\delta$ у сегнетоэлектриков.

Технические конденсаторные диэлектрики часто имеют сложную неоднородную структуру. В них диэлектрики обычно представлены в нескольких фазовых состояниях (аморфном, кристаллическом, жидком, газообразном). Поэтому у таких конденсаторных диэлектриков обнаруживаются свойства, порождаемые всеми этими составляющими.

При синусоидальном изменении во времени воздействующего поля диэлектрик характеризуется комплексной диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' + j\varepsilon_r'' + \frac{\widetilde{\gamma}}{j\omega\varepsilon_0},$$

где $\widetilde{\gamma} = \frac{j}{\dot{E}}$ — комплексная удельная проводимость диэлектрика на переменном токе. Вещественная часть диэлектрической проницаемости ε_r' характеризует плотность заряда на обкладках конденсатора и, следовательно, способность диэлектрика увеличивать за счет поляризации емкость конденсатора. Мнимая составляющая ε_r'' совместно с ε_r' определяет при данной частоте потери в диэлектрике, обусловленные как сквозной электропроводностью, так и релаксационными видами поляризации. Диэлектрические материалы принято характеризовать тангенсом угла диэлектрических потерь:

$$\mathrm{tg}\delta = \varepsilon_r''/\varepsilon_r'$$

или добротностью диэлектрика:

$$Q = 1/\mathrm{tg}\delta = \varepsilon_r'/\varepsilon_r''.$$

При увеличении частоты переменного электрического поля из-за ряда причин (инерционности заряженных частиц, проявления резонансных свойств и др.) относительная диэлектрическая проницаемость не остается постоянной: с ростом частоты она уменьшается (рис. 2.1.4). Изменение относительной диэлектрической проницаемости с частотой воздействующего на диэлектрик электрического поля называется *диэлектрической дисперсией.*

Различают *релаксационную диэлектрическую дисперсию,* связанную с ослаблением релаксационных видов поляризации при росте частоты, и *резонансную диэлектрическую дисперсию,* при которой имеются как спадающие, так и возрастающие участки в частотной зависимости ε_r (см. рис. 2.1.4). Рассеяние энергии, сопровождающее различные виды релаксационной поляризации, зависит от частоты воздействующего поля и времен релаксации τ. При $\omega \ll \frac{1}{\tau}$ частицы, участвующие в поляризации, успевают сместиться без значительных сил сопротивления; потери при этом невелики.

Почти отсутствуют потери при высоких

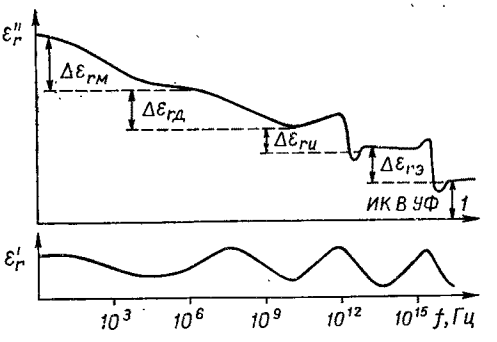


Рис. 2.1.4. Зависимость составляющих относительной комплексной диэлектрической проницаемости для диэлектрика с различными видами поляризации от частоты. $\Delta\varepsilon_{rм}$, $\Delta\varepsilon_{rд}$, $\Delta\varepsilon_{rи}$ и $\Delta\varepsilon_{rэ}$ — вклады соответственно миграционной, дипольной, ионной и электронной поляризаций; В — область видимого света; ИК и УФ — соответственно инфракрасная и ультрафиолетовая области

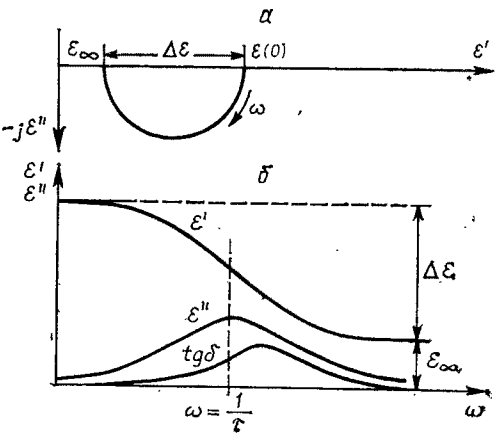


Рис. 2.1.5. Годограф комплексной диэлектрической проницаемости (*а*) и частотные зависимости ε', ε'' и $\mathrm{tg}\delta$ диэлектрика (*б*), обладающего мгновенными видами поляризации и релаксационной поляризацией с одним временем релаксации τ

частотах, когда поляризация, например ориентация дипольных молекул, не поспевает за быстро изменяющимся полем. И только в области частот, близких к $1/\tau$ (область релаксационной диэлектрической дисперсии), наблюдаются значительные релаксационные потери энергии (рис. 2.1.5).

§ 2.2. Электрические токи в конденсаторах

При воздействии электрического поля на диэлектрик в нем возникает электрический ток. Во внешней цепи и в металлических частях конструкции конденсатора (в выводах, обкладках и т. д.) этот ток представляет собой движение свободных зарядов — электронов, т. е. является током проводимости.

Через диэлектрик в то же время протекает такой же по значению ток, но состоящий из трех компонентов; так что для плотности тока через диэлектрик имеет место уравнение

$$j = j_{\text{с.п}} + \frac{\partial P}{\partial t} + \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t},$$

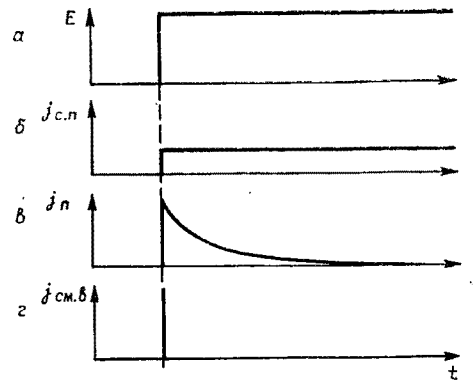


Рис. 2.2.1. Составляющие плотностей тока, протекающего через диэлектрик при скачкообразном изменении напряженности поля E (*а*), $j_{\text{с.п}}$, $j_{\text{п}}$ и $j_{\text{см.в}}$ — плотности тока сквозной проводимости, поляризационного тока и тока смещения в вакууме соответственно *б*, *в* и *г*

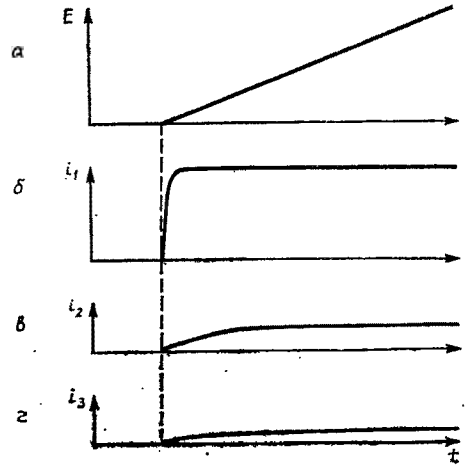


Рис. 2.2.2. Компоненты релаксационной составляющей поляризационного тока при линейно изменяющейся напряженности поля E (*а*) и временах релаксации τ_1 (*б*), τ_2 (*в*), τ_3 (*г*) при $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$

где $j_{\text{с.п}}$ — плотность сквозного тока; $\frac{\partial P}{\partial t}$ — плотность тока поляризации диэлектрика; $\varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$ — плотность тока смещения в вакууме.

Сквозной ток является током проводимости, и в большинстве конденсаторных диэлектриков он обусловлен свободными ионами, возникающими в диэлектрике при диссоциации его молекул или примесей (например, кислот). Свободные ионы, достигающие обкладок, нейтрализуются, вследствие чего происходит перенос вещества и образование новых химических веществ на обкладках.

В некоторых оксидах и сульфидах металлов существует электронная электропроводность, при которой не возникает переноса вещества. Электронная электропроводность в твердых диэлектриках обычно наблюдается при сильных электрических полях.

В жидких диэлектриках кроме этих видов имеет место молионная (электрофоретическая) электропроводность, обусловленная движением заряженных коллоидных частиц примесей. Путем очистки жидких диэлектриков достигается понижение их электропроводности. Благодаря сквозному току заряженный конденсатор после отключения его от источника напряжения постепенно разряжается.

Поляризационный ток также обусловлен движением зарядов, но в основном не свободных, а связанных, смещающихся в процессе поляризации; поэтому этот ток протекает только тогда, когда изменяется во времени поляризованность P (см. § 2.1). Другая составляющая поляризационного тока представляет собой движение свободных зарядов, не доходящих до обкладок, а закрепляющихся на границах раздела сред, на дефектах структуры и т. д., т. е. она связана с миграционной поляризацией, возникающей в неоднородных диэлектриках.

Поскольку поляризация диэлектриков обусловлена одновременным действием различных видов поляризации, протекающих во времени с различной скоростью, то и поляризационный ток можно рассматривать как некоторую сумму составляющих. Например, релаксационные виды поляризации при скачкообразном изменении напряженности поля сопровождаются протеканием экспоненциально изменяющихся токов с постоянными временами τ_i, равными временам релаксации. Поскольку в технических диэлектриках времена релаксации распределены в весьма широком диапазоне (от 10^{-10} до 10^{8} с), то и токи релаксационных видов поляризации затухают с распределенными в том же диапазоне постоянными временами.

Таким образом, ток релаксационных видов поляризации при скачкообразном изменении напряженности поля E

$$i_{\text{р}} = \sum_i I_i e^{-t/\tau_i}.$$

Упругие виды поляризации при скачкообразном воздействии поля E также сопровождаются токами в виде импульсов с продолжительностью порядка 10^{-15}—10^{-12} с, которые являются второй составляющей поляризационного тока.

Ток смещения в вакууме не связан с движением заряженных частиц вещества, а выражает одно из свойств электромагнитного поля: изменение электрического поля $\frac{\partial E}{\partial t}$ сопровождается появлением изменяющегося магнитного поля.

Ток смещения в вакууме так же, как и ток упругих видов поляризации диэлектрика, не сопровождается потерями энергии. Полный ток смещения состоит из тока смещения в вакууме и тока поляризации диэлектрика. Представления о протекающих токах при скачкообразном изменении напряженности электрического поля E иллюстрируются на рис. 2.2.1, *а—г*.

Разумеется, ни в одном реальном конденсаторе из-за индуктивности и активного сопротивления самого конденсатора и цепей питания невозможно достичь скачкообразного электрического поля, воздействующего на диэлектрик. На практике напряженность поля E, воздействующего на диэлектрик, нарастает с некоторой скоростью, например постоянной $\left(\frac{\partial E}{\partial t}=\text{const}\right)$. В этом случае ток смещения в вакууме и ток упругой поляризации будут иметь вид прямоугольного импульса, амплитуда которого пропорциональна $\frac{\partial E}{\partial t}$, а продолжительность равна времени, в течение которого $\frac{\partial E}{\partial t}=\text{const}$. Ток релаксационной поляризации при этом будет отличаться от суммы экспонент. На рис. 2.2.2, *а—г* показано изменение во времени компонент тока релаксационной поляризации, имеющих разные значения времен релаксации, при линейно изменяющейся напряженности поля E во времени.

Таким образом, при изменении напряженности поля E через конденсатор протекает ток, составляющие которого зависят от характера изменения напряженности поля и момента наблюдения.

Полный ток через реальный конденсатор можно рассматривать в виде трех составляющих: тока сквозной проводимости, нормального зарядного и аномального зарядного (тока абсорбции).

Нормальный зарядный ток представляет собой сумму тока мгновенных видов поляризации, тока смещения в вакууме, а также тока релаксационных видов поляризации с малыми временами релаксации ($\tau_i < 10^{-1}$—10^{-2} с).

Явление абсорбции (поглощения) и связанный с ним абсорбционный ток обусловлены в основном миграционной поляризацией (см. § 2.1). Явление абсорбции приводит к тому, что конденсатор не удается полностью зарядить или разрядить за малые промежутки времени. Если до затухания тока абсорбции конденсатор отключить от источника питания, то под влиянием поля, существующего между обкладками, эти токи будут продолжать протекать до устаиовления поляризации.

При кратковременном закорачивании обкладок конденсатора происходит только частичная деполяризация диэлектрика. Поэтому если до окончания процесса рассасывания зарядов обкладки разомкнуть, то

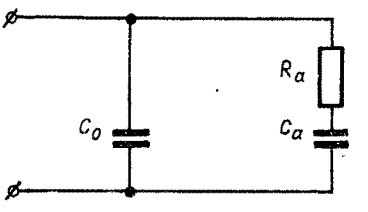


Рис. 2.2.3. Схема, поясняющая явление абсорбции

на них появятся индуцированные заряды и некоторое напряжение, обусловленное ими. В результате абсорбции на зажимах, отключенных от источников энергии конденсаторов, может появиться опасное для жизни напряжение, даже если они были предварительно разряжены. Во избежание этого рекомендуется выводы конденсаторов в нерабочем состоянии закорачивать. Явление абсорбции сильно проявляется у конденсаторов с керамическим, бумажным и комбинированным диэлектриками, а также у конденсаторов, у которых значительны замедленные виды поляризации, прежде всего миграционная.

Явление абсорбции можно пояснить с помощью эквивалентной схемы в виде емкости C_0, соответствующей быстрым видам поляризации и включенной параллельно ей релаксационной цепочки R_aC_a (рис. 2.2.3). Емкость C_a соответствует абсорбированным зарядам, а сопротивление R_a обеспечивает необходимое замедление зарядки и разряда емкости C_a и одновременно моделирует потери энергии при абсорбции.

Очевидно, что при включении такой цепи на постоянное напряжение емкость C_0 зарядится мгновенно, а напряжение на C_a будет возрастать по экспоненциальному закону с постоянной времени $\tau=R_aC_a$. При отключении источника напряжения от зажимов этой цепи с течением времени, если емкость C_a не успела полностью зарядиться, из-за перераспределения зарядов между C_0 и C_a напряжение на зажимах цепи несколько уменьшится.

После закорачивания зажимов цепи емкость C_0 разряжается мгновенно, а емкость C_a — медленно, сохраняя некоторое время заряды, которые после размыкания зажимов цепи перераспределяются между C_0 и C_a, создавая на них некоторое напряжение. У диэлектриков реальных конденсаторов процесс абсорбции обусловлен в основном миграционной поляризацией с целым спектром постоянных времени релаксации. Поэтому в эквивалентной схеме должно быть в общем случае достаточно

большое число R_aC_a-цепочек с различными постоянными времени (см. § 4.3).

Абсорбция определяет свойства конденсаторов в области инфранизких и низких частот. В частности, это явление следует учитывать при измерении сопротивления изоляции конденсатора, а также при составлении схемы замещения диэлектрика.

Если напряженность поля между обкладками изменяется во времени по синусои-

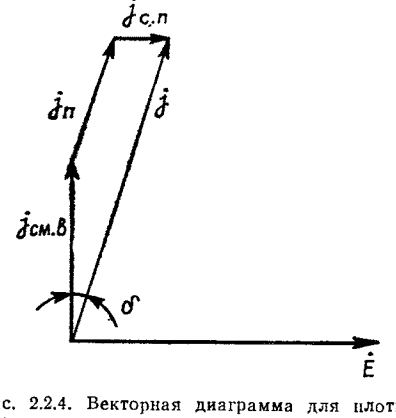


Рис. 2.2.4. Векторная диаграмма для плотностей тока, протекающего через диэлектрик

дальному закону, то в случае линейного диэлектрика упомянутые выше три компоненты полного тока конденсатора также будут изменяться по синусоидальному закону.

В этом случае комплексная плотность полного тока в диэлектрике

$$\dot{J}=\dot{J}_{с.п}+j\omega\dot{P}+j\omega\varepsilon_0\dot{E}$$

или

$$\dot{J}=\dot{J}_{с.п}+j\omega\varepsilon_0(1+\underline{\chi})\dot{E}=\dot{J}_{с.п}+\dot{J}_{см.в}+\dot{J}_п.$$

где $\underline{\chi}$ — комплексная диэлектрическая восприимчивость вещества.

Таким образом, плотность полного тока состоит из плотности тока сквозной проводимости $\dot{J}_{с.п}$, совпадающего по фазе с напряженностью поля $\dot{E}$, плотности тока смещения в вакууме $\dot{J}_{см.в}$, опережающего $\dot{E}$ на угол $\pi/2$, и плотности тока поляризации диэлектрика $\dot{J}_п$, опережающего $\dot{E}$ на угол несколько меньший, чем $\pi/2$ (рис. 2.2.4).

§ 2.3. Тепловыделение в конденсаторах

Источниками тепловыделения в конденсаторе являются: рабочий диэлектрик секций и вспомогательная изоляция (секционная, корпусная и др.), токоведущие части (выводы, соединительные шпильки, контактные узлы, обкладки) и металлические части конструкции (корпус, крышка), находящиеся в переменном магнитном поле рабочего тока конденсатора.

В диэлектрике тепловыделение возникает вследствие релаксационных процессов при изменении его поляризованности, потерь, связанных со сквозным током, а также из-за частичных разрядов (§ 2.4). Имеются также потери, обусловленные вибрацией обкладок (§ 2.6).

Основной вклад в потери при нормальных условиях на переменном напряжении вносят поляризационные процессы (дипольная и миграционная поляризации). Ионизационные процессы дают заметную составляющую потерь только в форсированных режимах, когда имеют место критические частичные разряды (см. § 2.4). Тепловыделение в пассивной изоляции, которая является диэлектриком паразитных конденсаторов, образованных емкостью секций на корпус и друг с другом, незначительно ввиду малости этих емкостей и им обычно пренебрегают. Удельные потери (Вт/м^3) в диэлектрике при синусоидальном напряжении

$$P_{уд}=\gamma E^2, \qquad (2.3.1)$$

где E — действующее значение напряженности электрического поля в диэлектрике (В/м); $\gamma=0{,}55\cdot10^{-10}f\varepsilon_r\operatorname{tg}\delta$ — удельная активная электропроводимость диэлектрика при синусоидальном напряжении. Напряженность поля, диэлектрическая проницаемость и $\operatorname{tg}\delta$ различны в разных точках объема конденсатора, поэтому потери в диэлектрике

$$P_д=\int_V P_{уд}\,dV.$$

Пространственное распределение источников тепловыделения зависит от значений E, ε_r и $\operatorname{tg}\delta$, определяющихся в свою очередь температурным полем конденсатора, однородностью диэлектрика и другими факторами. При несинусоидальном напряжении зависимость удельных потерь в диэлектрике та же, что и (2.3.1), но удельная активная проводимость диэлектрика представляет собой сложную функцию параметров и формы воздействующего напряжения. В связи с этим расчет тепловыделения в диэлектрике при несинусоидальном напряжении значительно усложняется (§ 5.3).

В токоведущих металлических частях тепловыделение происходит в результате протекания по ним тока конденсатора. Мощность потерь здесь определяется действующим значением тока и активным сопротивлением элемента конструкции:

$$P_м=I^2r_м. \qquad (2.3.2)$$

Вследствие неравномерности распределения тока по обкладкам (рис. 2.3.1) тепловыделение в них также неравномерно (рис. 2.3.2). Распределение токов и мощностей тепловыделения на рис. 2.3.1 и 2.3.2 заштриховано. Так, в каждой обкладке секции со скрытой фольгой при подводе тока к концам обкладок

$$P_y=P_y^m\left(\frac{x-l}{l}\right)^2,\quad 0\leqslant x\leqslant l,$$

где $P_y^m=\rho\dfrac{I^2}{bd}$ — максимальное удельное

тепловыделение в обкладке, имеющееся в точке с координатой $x=0$, т. е. в районе контактного узла; l — длина обкладки; b и d — ее ширина и толщина; ρ — удельное сопротивление металла обкладки. Распределение суммарной мощности тепловыделения в двух обкладках на рис. 2.3.2 показано пунктирными линиями.

Мощность потерь в двух таких обкладках составит

$$P_0 = \frac{2}{3} I^2 \rho \frac{l}{bd},$$

а в обкладках при подводе тока в середине длины обкладок (рис. 2.3.1, *а*) —

$$P_0 = \frac{1}{6} I^2 \rho \frac{l}{bd}.$$

Для секции с выступающей фольгой при образовании контактного узла по всей длине обкладок (рис. 2.3.1, *б*) удельные потери в них распределены по ширине обкладок следующим образом:

$$P_y = \begin{cases} P_y^m, \ 0 \leqslant x \leqslant \Delta b; \\ P_y^m \left(\dfrac{x - \Delta b}{b - \Delta b} \right)^2, \ \Delta b \leqslant x \leqslant b - \Delta b. \end{cases}$$

Потери в двух обкладках составят

$$P_0 = \frac{2}{3} I^2 \rho \frac{b/3 + \Delta b}{ld}.$$

Также распределены потери и в металлизированных обкладках, мощность тепловыделения в которых

$$P_0 = \frac{2}{3} I^2 r_c \frac{b/3 + \Delta b}{l}, \qquad (2.3.3)$$

где r_c — сопротивление квадратного участка слоя металлизации, которое для современных конденсаторов обычно составляет 2—5 Ом.

В действительности потери в металлизированных обкладках в 1,5—6,0 раз больше, чем получаемые по формуле (2.3.3), потому что обкладки контактируют с шоопировкой (см. § 3.2) не по всей длине, в результате чего в зонах контактирования увеличиваются плотность тока и потери энергии.

По той же причине потери возрастают в выступающих фольговых обкладках, если контактные узлы образованы не по всей длине обкладок. В секциях с металлизированными и скрытыми фольговыми обкладками имеет место тепловыделение в контактном узле, обусловленное переходным сопротивлением неидеального контакта между обкладками и контактными узлами.

Потери в обкладках плоского многопластинчатого конденсатора, например слюдяного, равны

$$P_0 = I^2 \frac{4M - 2}{M^2} \rho \frac{l - \Delta b/3}{bd},$$

где M — число параллельно соединенных элементарных емкостей.

Расчет потерь в обкладках высоковольтных керамических конденсаторов при различных положениях и размерах токопроводов приведен в [В.3, В.17], а для вакуумных и газонаполненных конденсаторов — в [В.3]. Наибольшую сложность представляет расчет тепловыделения в обкладках конденсаторов, работающих в импульсных режимах [2.4—2.7].

В работе [2.8] получено комплексное сопротивление конденсатора, учитывающее

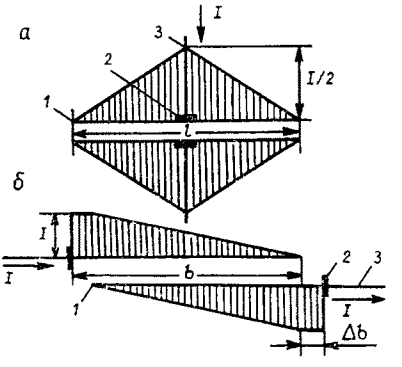


Рис. 2.3.1. Распределение тока по длине фольговых обкладок при подводе тока в середине длины скрытых (*а*) и по ширине выступающих обкладок (*б*): *1* — обкладки; *2* — контактный узел; *3* — выводы; *I* — ток; *l* — длина обкладок; *b* — ширина обкладок; Δb — закраина

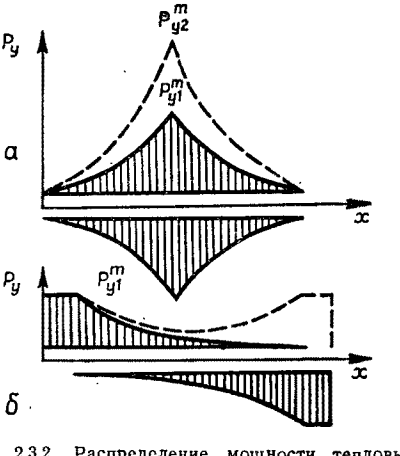


Рис. 2.3.2. Распределение мощности тепловыделения в скрытых обкладках при подводе тока в середине их длины (*а*) и в выступающих обкладках (*б*)

распределенность в пространстве емкости, активного сопротивления и индуктивности обкладок.

Тепловыделение в выводах и внутренних соединительных шинках — главная составляющая потерь в конденсаторах на средних и высоких частотах. Значение таких потерь рассчитывается по формуле (2.3.2) с учетом того, что активное сопротивление этих элементов вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости зависит от частоты.

Так, мощность тепловыделения в одном выводе конденсатора круглого сечения при сильном поверхностном эффекте ($\Delta < 0{,}1 d_в$) приближенно равна

$$P_в \approx I^2 \frac{l_в}{d_в \pi \gamma_м \Delta}, \qquad (2.3.4а)$$

где I — действующее значение тока, протекающего через вывод; $d_в$ и $l_в$ — диаметр и длина вывода; $\gamma_м$ — удельная проводимость металла вывода; $\Delta = \sqrt{1/\pi f \mu_а \gamma_м}$ —

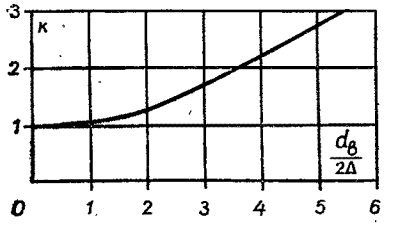


Рис. 2.3.3. Зависимость отношения сопротивления круглого проводиика на переменном токе к сопротивленню на постоянном токе от отношения его радиуса ($d_в/2$) к глубине проникновения электромагнитного поля Δ

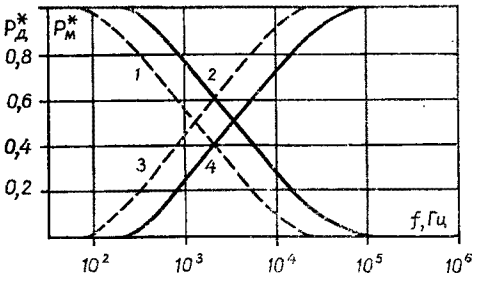


Рис. 2.3.4. Частотные зависимости относительной доли потерь в диэлектрике $P_д^* = \frac{P_д}{P_д + P_м}$ (*1, 2*) и металлических частях конструкцин $P_м^* = \frac{P_м}{P_д + P_м}$ (*3, 4*) для конденсаторов емкостью 1,0 мкФ с неполярным диэлектриком с металлизированными (*1, 3*) и выступающими фольговыми (*2, 4*) обкладкамн

глубина проникновения электромагнитного поля в металл вывода; $\mu_а = \mu_т \mu_0$ — абсолютная магнитная проницаемость металла вывода ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м).

Прн слабом поверхностном эффекте ($\Delta \geqslant d_в$) мощность потерь в выводе определяется по формуле

$$P_в = I^2 \frac{4 l_в}{\pi \gamma_м d_в^2}. \qquad (2.3.4б)$$

Более точные значения мощиости потерь в одном выводе находятся следующим образом:

$$P_в = I^2 \frac{4 l_в}{\pi \gamma d_в} k(d_в/2\Delta), \qquad (2.3.4в)$$

где $k(d_в/2\Delta)$ — коэффициент, определяемый по рис. 2.3.3.

Пример. Необходимо рассчитать мощность тепловыделения в двух выводах конденсатора, по которым протекает ток $I = 250$ А, при следующих данных; $d_в = 16$ мм, $l_в = 100$ мм, $f_1 = 10^3$ Гц, $f_2 = 10^4$ Гц, материал выводов — латунь с $\gamma_м = 1{,}5 \times 10^7$ МСм/м.

Так как материал выводов немагнитный, то $\mu_т = 1$ и $\mu_а = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м. Глубина проникновения на частоте f_1 $\Delta_1 = \sqrt{1/\pi \times 10^3 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1{,}5 \cdot 10^7} \approx 4{,}1 \cdot 10^{-3}$ м и на частоте f_2 — $\Delta_2 = 1{,}3 \cdot 10^{-3}$ м. Отношения

$$\frac{d_в}{2\Delta_1} = \frac{16 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4{,}1 \cdot 10^{-3}} = 1{,}45 \text{ и } \frac{d_в}{2\Delta_2} = 6{,}15.$$

При $f_1 = 10^3$ Гц значение $0{,}1\, d_в = 1{,}6 \times 10^{-3}$ м $< \Delta_1 = 4{,}1 \cdot 10^{-3}$ м $< d_в = 16 \cdot 10^{-3}$ м, поэтому мощность тепловыделения в выводе находим по формуле (2.3.4 в). Согласно рис. 2.3.3 значение $k \approx 1{,}2$ при $d_в/2\Delta_1 = 1{,}95$. Мощность тепловыделения в выводе

$$P_в = \frac{250^2 \cdot 4 \cdot 0{,}1 \cdot 1{,}2}{1{,}5 \cdot 10^7 \cdot 0{,}016^2} \approx 2{,}5 \text{Вт}.$$

В двух выводах $P = 2P_в = 5$ Вт.

При $f_2 = 10^4$ Гц значение $\Delta_2 = 1{,}3 \times 10^{-3}$ м $< 0{,}1 d_в = 1{,}6 \cdot 10^{-3}$ м, т. е. поверхностный эффект сильный, и мощность потерь определяется по формуле (2.3.4 а):

$$P_в = \frac{250^2 \cdot 0{,}1}{0{,}016 \cdot \pi \cdot 1{,}5 \cdot 10^7 \cdot 1{,}3 \cdot 10^{-3}} \approx 6{,}35 \text{ Вт}.$$

В двух выводах $P = 2P_в = 12{,}7$ Вт. Более точное значение мощности потерь (13,8 Вт) в последнем случае получается с использованием формулы (2.3.4 в).

В металлических крышке и корпусе конденсатора при протекании переменного тока возникают вихревые токи, обуславливающие дополнительные потери энергии. Эти потери существенно возрастают, если крышка и корпус выполнены из стали, при этом к ним добавляются потери на гистерезис. Так, по данным [2.9, 2.10], потери в крышке в низковольтных конденсаторах могут составить до 10—20% от общих потерь при частоте 50 Гц и до 25—40% при частоте 100—400 Гц. Потери в крышке и корпусе значительно возрастают с увеличением частоты и рабочего тока конденсаторов. Полные потери энергии и соответственно их мощность в конденсаторе равны сумме потерь в диэлектрике и металле:

$$P_\Sigma = P_д + P_м. \qquad (2.3.5)$$

Как абсолютная величина каждой из этих составляющих потерь, так и их относительная доля в полных потерях существенно зависят от конструкции конденсатора (в первую очередь от типа обкладок и диэлектрика), электрического и теплового режимов работы.

Так, при постоянном напряжении потери в конденсаторе обусловлены током утечки, сильно зависящим от температуры

Таблица 2.3.1

Конденсаторы	Характерная особенность конструкции и функциональное назначение конденсаторов	$P_д$, %	$P_м$, %	В том числе, %		
				$P_о$	$P_в$	$P^{*)}_{к.у}$
На низкие частоты (до 10^2 Гц)	На низкое напряжение для повышения коэффициента мощности	88—85	12—15	8—9	3—4	1—2
	На высокое напряжение для повышения коэффициента мощности	90—95	5—10	3—7	1—2	0,5—1,0
На средние частоты ($10^2 \div 2 \cdot 10^4$ Гц)	С фольговыми выступающими обкладками	5—30	70—95	1—2	65—80	4—13
	С металлизированными обкладками	40—70	30—60	20—35	2—3	8—22
	С фольговыми скрытыми обкладками	20—60	40—80	35—68	3—8	2—4
	Оксидно-электролитические	5—15	70—85	65—73**)	3—8	2—4
На высокие частоты (свыше $2 \cdot 10^4$ Гц)	Керамические высоковольтные	10—30	70—90	46—58	20—36	4—6
	Вакуумные и газонаполненные	3—10	90—97	40—55	30—55	5—2
	С фольговыми выступающими обкладками	1—20	80—99	2—5	75—89	3—5

*) $P_{к.у}$ — потери в контактных узлах. **) Для оксидно-электролитических конденсаторов потери в обкладках представляют собой потери в сопротивлении электролита.

и вида диэлектрика, а для ряда видов диэлектрика — и от значения напряжения.

При пульсирующем напряжении низкой частоты заметной становится доля поляризационных потерь, а при высокой частоте пульсаций тепловыделение связано в основном с потерями в металле конструкции конденсатора.

Доля потерь в металле при прочих одинаковых условиях в случае несинусоидального напряжения возрастает, причем при импульсном характере тока тем больше, чем выше частота повторения и меньше длительность импульса тока (§ 5.3).

Характерной особенностью потерь в металле конструкции является слабая зависимость от температуры, а также их локализация в сравнительно малых объемах (потери в выводах, соединительных шинках, предохранителях, контактных узлах), что затрудняет рассеяние тепла и в ряде случаев может привести к увеличению внутреннего теплового сопротивления конденсаторов (см. § 4.4, 5.4).

Влияние конструкции конденсаторов и частоты синусоидального тока на относительное значение потерь в металле и диэлектрике показано на рис. 2.3.4. Рабочие напряжения и емкости ($C=1{,}0$ мкФ) конденсаторов при этом приняты одинаковыми. При бо́льших значениях емкостей кривые сдвигаются на графике влево, при меньших — вправо.

Общие характеристики составляющих потерь в различных конденсаторах в области их основного применения приведены в табл. 2.3.1.

§ 2.4. Частичные разряды в изоляции конденсаторов

Понятие частичных разрядов (ЧР) в изоляции охватывает местные разряды внутри изоляции или на поверхности, которые не приводят к полному пробою межэлектродного промежутка и могут быть в виде короны, скользящих разрядов или частичных пробоев отдельных элементов изоляции. ЧР разрушают жидкую и твердую компоненты изоляции за счет энергии, выделяющейся при разрядах.

Интенсивность ЧР принято характеризовать кажущимся зарядом $q_{чр}$, числом $r_{чр}$ в секунду $n_{чр}$, мощностью ЧР $P_{рч}$. С постепенным повышением напряжения на испытуемом объекте при некотором значении напряжения в изоляции появляются ЧР слабой интенсивности (порядка $10^{-14} \div 10^{-12}$ Кл). При снижении напряжения несколько ниже напряжения возникновения ЧР эти процессы прекращаются. Особенность рассматриваемого вида ЧР состоит в том, что их появление при кратковременных воздействиях не приводит к заметному разрушению изоляции и снижению напряжения возникновения ЧР. Длительное существование таких ЧР определенной интенсивности (в течение тысячи часов и более) приводит к медленному разрушению диэлектрика и вызывает рост его $\mathrm{tg}\delta$. Такие разряды называются начальными. ЧР большей интенсивности (порядка $10^{-10} \div 10^{-9}$ Кл) быстро разрушают некороностойкую изоляцию. Такие ЧР называются критическими.

Для названных выше видов ЧР принято оценивать: напряжение начальных ЧР $U_{нач}$ — наименьшее напряжение существования ЧР слабой интенсивности, не приводящих к заметному разрушению некороностойкой изоляции или к уменьшению напряжения возникновения ЧР при кратковременном воздействии; напряжение критических ЧР $U_{кр}$ — наименьшее напряжение существования ЧР значительной интенсивности, способных вызвать быстрое заметное разрушение некороностойкой изоляции. Для каждого из перечисленных видов ЧР характерны свои напряжения зажигания (возникновения) и погасания.

Частичные разряды при переменном напряжении. В непропитанных пленочных конденсаторах ЧР возникают в прослойках газа, находящихся между слоями пленки или между пленкой и фольгой. Пропитка изоляции жидкими диэлектриками существенно повышает напряженность ЧР. Поэтому в конденсаторах на высокое напряжение чаще всего применяется пропитанная изоляция.

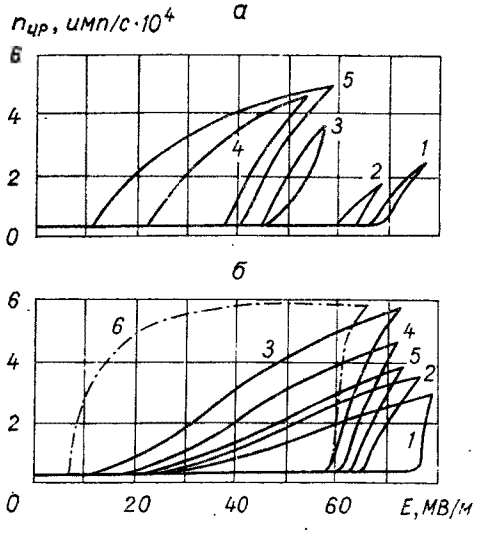


Рис. 2.4.1. Зависимость интенсивности критических ЧР от напряженности электрического поля при подъеме и снижении напряжения; *а* и *б* — бумажные конденсаторы соответственно с пропиткой трихлордифенилом и МГТ-45 при *T*, °С: *1*—80; *2*—50; *3*—20; *4*—0; *5*—минус 20; *6*—пропитка нефтяным маслом

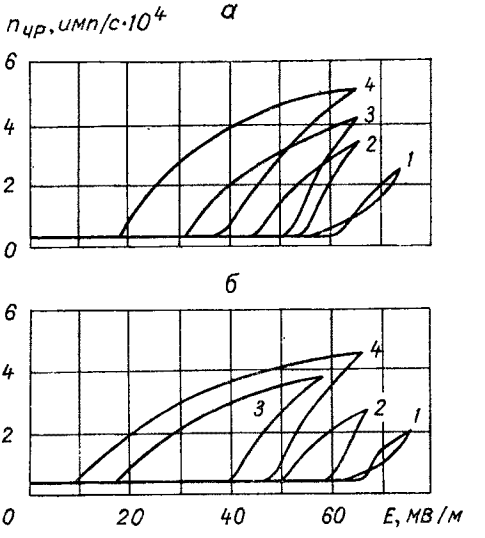


Рис. 2.4.2. Зависимость интенсивности критических ЧР от напряженности электрического поля при подъеме и снижении напряжения: *а* и *б*— бумажные конденсаторы соответственно с пропиткой МГ-15 и пентахлордифенилом при *T*, °С: *1*—90; *2*—50; *3*—20; *4*—0

В изоляции секций с жидкими неполярными пропиточными диэлектриками при переменном напряжении наибольшая напряженность возникает в прослойке жидкого диэлектрика, так как напряженности обратно пропорциональны диэлектрическим проницаемостям компонентов. При использовании полярных пропитывающих жидкостей с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_r = 5{,}5—6{,}0$ напряженность в прослойке жидкого диэлектрика мало отличается от напряженности в бумаге. Так как, однако, электрическая прочность жидкого диэлектрика значительно ниже прочности пропитанной бумаги или пленки, то ЧР возникают прежде всего в жидком диэлектрике. Следует учитывать, что в хорошо высушенной и пропитанной изоляции нет пузырьков воздуха или какого-либо другого газа. Газовые включения могут образоваться лишь при интенсивном разложении масла из-за ЧР в изоляции конденсатора либо в результате нарушения технологического процесса сушки и пропитки.

В конденсаторной изоляции ЧР при переменном напряжении возникают прежде всего на краях обкладок, где напряженность электрического поля повышенная.

Малая толщина бумаги и пленок (4—30 мкм) позволяет получать в секциях конденсаторов изоляцию с малой толщиной диэлектрика d (20÷150 мкм), обладающую высокой электрической прочностью и большой напряженностью ЧР $E_{чр}$, которая в соответствии с (4.6.4) увеличивается пропорционально $1/\sqrt{d}$.

Переход начальных ЧР в критические для слоистой изоляции, пропитанной жидким диэлектриком, связан либо с возникновением скользящих разрядов у края фольги, либо с возникновением в толще изоляции газовых включений. Последнее наиболее сильно проявляется в изоляции, пропитанной нефтяным маслом.

При наличии ЧР в изоляции происходят разложение жидкого диэлектрика с образованием газообразных продуктов и одновременно непрерывное поглощение образующихся газов как за счет растворения газа в жидком диэлектрике, так и за счет химического связывания газа (в основном водорода). Последнее наиболее сильно в жидкостях, в которых имеются непредельные углеводороды. Когда интенсивность газовыделения (масса выделившегося газа в единицу времени) превосходит интенсивность поглощения газов, возникают условия для образования газовых пузырьков. Из-за пробоев в таких пузырьках резко возрастает интенсивность ЧР — на 2—3 порядка (появление критических ЧР), что приводит к дальнейшему росту этих пузырьков и сильному снижению напряжения возникновения ЧР. Вследствие этого при росте напряжения ЧР возникают при бо́льших его значениях, а их интенсивность значительно меньше, чем при снижении напряжения (рис. 2.4.1, 2.4.2).

Если после снижения напряжения критические ЧР в дальнейшем не появляются

или изоляция не находится под напряжением, то образовавшиеся газовые включения растворяются в жидком диэлектрике и напряжение возникновения ЧР может увеличиться.

Изложенные закономерности протекания ЧР характерны для бумажно-масляной изоляции. При пропитке бумажного конденсаторного диэлектрика хлордифенилами или их смесями между собой и разбавителями развитию и протеканию процессов присущи некоторые специфические особенности [В.4—В.7]. Хлордифенилы при разложении под воздействием ЧР не выделяют такого количества газов, как при пропитке нефтяным маслом.

Благодаря намного меньшему газовыделению или его отсутствию напряжение возникновения ЧР изменяется слабее или остается постоянным.

Однако под действием ЧР у хлордифенилов выделяются углерод в виде сажи и хлористый водород, что способствует разрушению твердого диэлектрика. В целом же рост интенсивности ЧР и разрушение твердой фазы конденсаторного диэлектрика с хлорированной пропиткой происходят значительно медленнее, чем в диэлектрике с пропиткой нефтяным маслом. Если бумажно-хлордифениловый диэлектрик довести до возникновения в нем критических ЧР и оставить при этом напряжении, то через некоторое время ЧР прекратятся, так как выделяющийся при разложении хлордифенилов углерод шунтирует очаг ЧР и гасит разряды. Этому благоприятствует и малое газовыделение при разложении хлордифенилов и их большая газопоглощающая способность. Чтобы вызвать появление критических ЧР, нужно повысить напряжение против прежнего уровня. При этом процесс будет носить такой же характер.

Затухание ЧР особенно заметно при вязкости жидкостей ниже $5 \cdot 10^{-3}$ м^2/с. На рис. 2.4.1 и 2.4.2 [В.7] приведены зависимости интенсивности ЧР в конденсаторах, пропитанных различными жидкостями, от напряженности электрического поля при разных температурах, подъеме и снижении напряжения. Как видно из рисунков, изменения напряжения возникновения и интенсивности ЧР при подъеме и снижении напряжения у изоляции, пропитанной хлордифенилами, значительно меньше, чем у изоляции, пропитанной нефтяным маслом. С повышением температуры (снижением вязкости жидкости) затухание ЧР происходит при меньшем снижении напряженности, т. е. быстрее. При кинематической вязкости хлорированных жидкостей ниже $5 \cdot 10^{-3}$ м^2/с неоднократные быстро следующие друг за другом повышения напряжения до величины возникновения ЧР не приводят к уменьшению напряженности ЧР. Опыты показали, что конденсаторы, пропитанные трихлордифенилом, работают без выхода из строя более 10^3 часов при напряженности критических ЧР, тогда как конденсаторы с пропиткой нефтяным маслом в таком режиме работают 1—6 часов [2.11].

Интенсивность ЧР, а следовательно, и скорость разрушения диэлектрика конденсатора сильно возрастают с ростом напряженности (рис. 2.4.3). При напряжении промышленной частоты для тока $I_{ЧР}$ и мощности $P_{ЧР}$ начальных ЧР имеют место следующие зависимости:

$$I_{ЧР} = A_1 U^{a1} = A_2 E^{a_1}; \qquad (2.4.1)$$

$$P_{ЧР} = A_3 U^{a} = A_4 E^{a}, \qquad (2.4.2)$$

где $a = a_1 + 1$, колеблется от 5 до 8 и в среднем может быть принята равной 6.

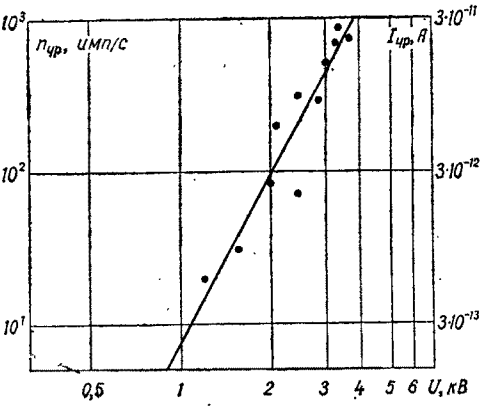


Рис. 2.4.3. Зависимость интенсивности ЧР $n_{ЧР}$, $I_{ЧР}$ от напряжения на образце бумажно-масляного диэлектрика толщиной 80 мкм

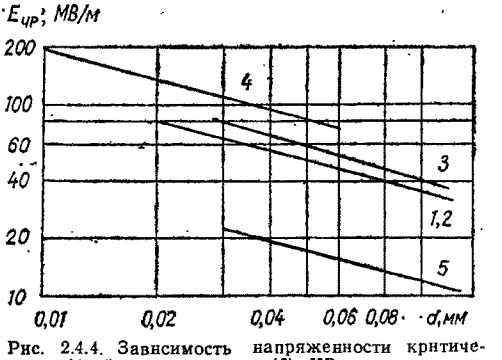


Рис. 2.4.4. Зависимость напряженности критических (*1—4*) и начальных (*5*) ЧР от толщины диэлектрика: *1—5*—бумага КОН-1, пропитка конденсаторным маслом; *2, 3* и *4*—соответственно бумага КОН-1, бумажно-полипропиленовая изоляция и полипропиленовая пленка, пропитка трихлордифенилом

Зависимость напряженности ЧР от толщины диэлектрика. Для изоляции, находящейся в сильно неоднородном поле, толщина диэлектрика секции d определяет напряженне $U_{ЧР}$ и среднюю напряженность $E_{ЧР} = U_{ЧР}/d$ начала развития ЧР, которые характеризуются электрической прочностью изоляции в области острого края электрода.

В соответствии с формулами (4.6.3) и (4.6.4) средняя напряженность возникновения ЧР

$$E_{ЧР} = Ad^{-0,5}, \qquad (2.4.3)$$

что хорошо подтверждается экспериментально. На рис. 2.4.4 приведены зависимости напряженностей критических и начальных ЧР от толщины для различных видов диэлектрика. Эти зависимости можно представить эмпирическими формулами, в которых показатель степени при d близок к 0,5. Зависимости напряженности начальных ЧР (на уровне $3\cdot10^{-15}$—10^{-14} Кл) от толщины диэлектрика практически сов-

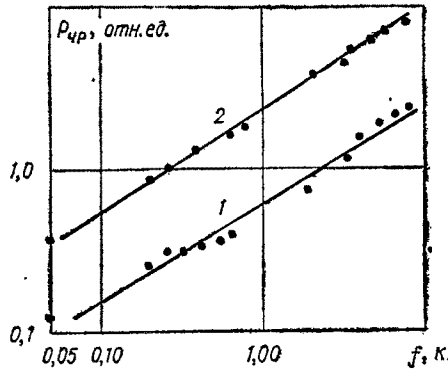


Рис. 2.4.5. Зависимость мощности ЧР от частоты приложенного напряжения (d=30 мкм) при E, МВ/м: 40 (*1*) и 50 (*2*)

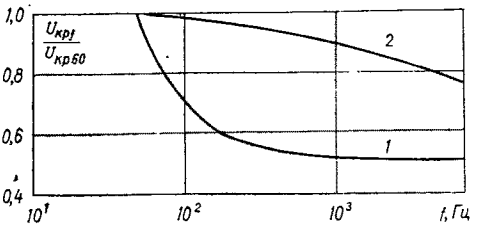


Рис. 2.4.6. Зависимость напряжения критических ЧР от частоты приложенного напряжения для бумажной изоляции при пропитке конденсаторным маслом (*1*) и трихлордифенилом (*2*)

падают и для средних значений равны [2.12]:

$$E_{нач}=3{,}6d^{-0{,}5}, \qquad (2.4.4)$$

где d — толщина изоляции, в мм (т. е. $3\cdot10^{-2}\leqslant d\leqslant1$ мм); $E_{нач}$ выражена в МВ/м. Коэффициент вариации приблизительно равен 10%.

Зависимости напряженности критических ЧР от толщины диэлектрика для бумаги КОН-1, пропитанной конденсаторным маслом или трихлордифенилом, имеют вид

$$E_{кр}=9{,}5d^{-0{,}58}, \qquad (2.4.5)$$

где d — толщина изоляции, в мм; $E_{кр}$ — напряженность электрического поля, в МВ/м.

Разброс напряженности критических ЧР для отдельных образцов характеризуется коэффициентом вариации, равным 10%.

Напряженности критических ЧР для бумажно-полипропиленовой (50% пленки) изоляции, пропитанной трихлордифенилом, на 20% выше, а для полипропиленовой изоляции с пропиткой трихлордифенилом на 35% выше, чем для бумажной (рис. 2.4.4). Это объясняется уменьшением диэлектрической проницаемости твердого диэлектрика и соответственно снижением напряженности поля в прослойках жидкости.

При неизменной толщине диэлектрика изменение количества слоев (например, увеличение количества листов бумаги с соответствующим уменьшением толщины одного листа) не приводит к заметному изменению напряжения ЧР.

Влияние различных факторов на характеристики частичных разрядов

Зависимость характеристик частичных разрядов от частоты приложенного напряжения. Повышение частоты приложенного напряжения не меняет характера зависимости тока $I_{чр}$ от напряженности электрического поля, однако приводит к увеличению интенсивности ЧР, что объясняется ростом числа полупериодов, а следовательно, и числа $n_{чр}$ разрядов в секунду. Однако увеличение $P_{чр}$ и $n_{чр}$ с ростом частоты происходит не прямо пропорционально частоте, а несколько слабее (рис. 2.4.5). На основании экспериментальных данных была установлена зависимость [2.13]:

$$P_{чр}=A_f f^{0{,}62}. \qquad (2.4.6)$$

Напряжение критических ЧР существенно зависит от частоты приложенного напряжения и при достаточно больших частотах стремится к напряжению начальных ЧР.

Зависимость $E_{кр}$ от f для изоляции толщиной 80 мкм из конденсаторной бумаги, пропитанной нефтяным маслом, приведена на рис. 2.4.6 (кривая *1*). При $f>1$ кГц напряжение критических ЧР не отличается от напряжения начальных ЧР. Для изоляции с пропиткой хлордифенилами зависимость напряжения критических ЧР от частоты заметно слабее вследствие большей стойкости этих жидкостей к разложению (газовыделению) в электрическом поле (рис. 2.4.6, кривая *2*).

Зависимость характеристики ЧР от избыточного давления пропитывающего состава. Повышение избыточного пропитывающего состава приводит к значительному увеличению напряжения ЧР. Такое влияние избыточного давления сказывается при ЧР, являющихся результатом как пробоев прослоек жидкого диэлектрика, так и пробоев газовых включений. В первом случае с ростом избыточного давления увеличивается электрическая прочность жидкости, а во втором — прочность газового включения. Пробои газовых включений возможны, когда размеры их достаточно велики и достигают десят-

ков микрон и более. Для включений таких размеров разрядные напряжения лежат в правой части кривой Пашена, и с повышением избыточного давления напряжение возрастает.

На рис. 2.4.7 приведена зависимость $E_{кр}$ от избыточного давления масла. Напряженность критических ЧР с ростом давления увеличивается приблизительно во столько же раз, во сколько повышается прочность нефтяного масла.

Зависимость напряженности критических ЧР от давления ($P_ж$) в диапазоне значений $(1—7)\cdot10^5$ Па для конденсаторной изоляции из бумаги КОН-1 может быть представлена в виде

$$E_{кр}=40(1+1{,}1\cdot10^{-6}P_ж), \quad (2.4.7)$$

где $E_{кр}$ выражена в МВ/м, $P_ж$ — в Па. Уменьшение давления ниже атмосферного может привести к снижению напряжения ЧР. Такое явление может произойти вследствие снижения давления в герметичном конденсаторе при уменьшении температуры.

Зависимость напряженности ЧР от температуры. Напряженность ЧР в диэлектрике конденсатора может зависеть от температуры, причем температурное изменение ее различно для пропитки нефтяным маслом и полярными жидкостями.

Для бумажно-масляной изоляции отсутствует заметная зависимость напряженности ЧР при изменении температуры от —40 до +80°С. При этом наблюдается слабая тенденция к увеличению напряженности ЧР с ростом температуры (рис. 2.4.8).

Для бумажной изоляции, пропитанной различными полярными жидкими диэлектриками (см. рис. 2.4.8) [2.14], имеет место минимум в кривой $E_{кр}(T)$, причем чем ниже температура застывания жидкости, тем ниже температура, соответствующая минимуму $E_{кр}$, который располагается на 15—20°С выше температуры застывания жидкости при вязкости порядка 5×10^{-3} м²/с. Наличие минимума $E_{кр}$ объясняется аналогичным минимумом в зависимости пробивной напряженности пропитывающих жидкостей от температуры.

Несколько слабее минимум $E_{кр}(T)$ наблюдается в конденсаторах с бумажно-пленочным диэлектриком на основе полипропиленовой пленки с пропиткой трихлордифенилом (рис. 2.4.9).

Зависимость напряжения критических ЧР от формы кривой воздействующего напряжения. При синусоидальном напряжении разряды в рассматриваемой области диэлектрика повторяются через промежутки времени, соответствующие изменению напряжения на включении

$$\Delta U_в = U_{в.з} - U_{в.п},$$

где $U_{в.з}$ — напряжение зажигания разряда во включении; $U_{в.п}$ — напряжение погасания разряда во включении. При прохождении напряжения через максимум включение находится под напряжением, значение которого лежит в интервале между $U_{в.з}$ и $U_{в.п}$. Затем напряжение на включении уменьшается до нуля и продолжает расти до $U_{в.з}$. В первом приближении можно принять, что при обеих полярностях пробивное напряжение включения одинаково. При достижении напряжением на включении значения $U_{в.з}$ происходит пробой включения и процесс продолжается, как было описано выше (рис. 2.4.10,*а*).

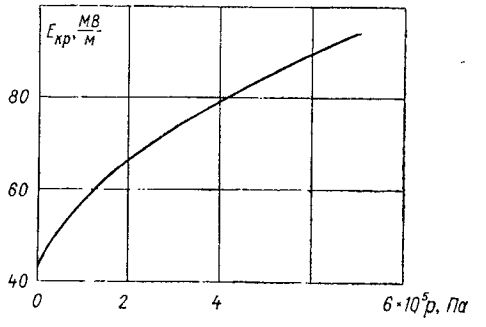


Рис. 2.4.7. Зависимость напряженности критических ЧР от давления масла

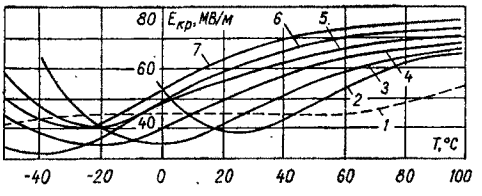


Рис. 2.4.8. Зависимость напряженности критических ЧР от температуры для бумажной изоляции, пропитанной различными жидкими диэлектриками: *1*—нефтяное конденсаторное масло; *2*—пентахлордифенил; *3*—трихлордифенил; *4*—КЖ1-35; *5*—КЖ2-45; *6*—пирален-1477; *7*—КЖ2-50

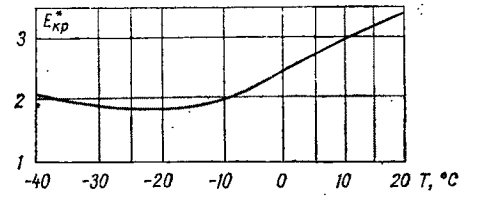


Рис. 2.4.9. Зависимость напряженности критических ЧР ($E^*_{кр}=E_{кр}/E_{раб}$) от температуры для бумажно-полипропиленового диэлектрика, пропитанного трихлордифенилом (частота 60 Гц)

Таким образом, ЧР прекращаются при прохождении напряжения через максимум и вновь возникают после изменения напряжения на выводах испытуемого объекта на величину U_1, соответствующую изменению напряжения на включении на величину $U_{в1}=U_{в.з}+U_{в.п}$, причем

$$U_1=\frac{1}{\eta}(U_{в.з}+U_{в.п})=\frac{U_{в1}}{\eta}; \quad (2.4.8)$$

$$\eta = \frac{C_в}{C_д + C_в}, \qquad (2.4.9)$$

где $C_в$ — емкость элемента диэлектрика, участвующего в ЧР; $C_д$ — емкость элемента диэлектрика, включенного последовательно с $C_в$.

В дальнейшем после возобновления ЧР разряды в рассматриваемой области диэлектрика по-прежнему повторяются через промежутки времени, соответствующие изменению напряжения на емкости $C_в$ на величину $\Delta U_в$ или на электродах испытуемого образца на величину $\Delta U = \Delta U_в/\eta$. Таким образом, число разрядов по включении за один полупериод равно

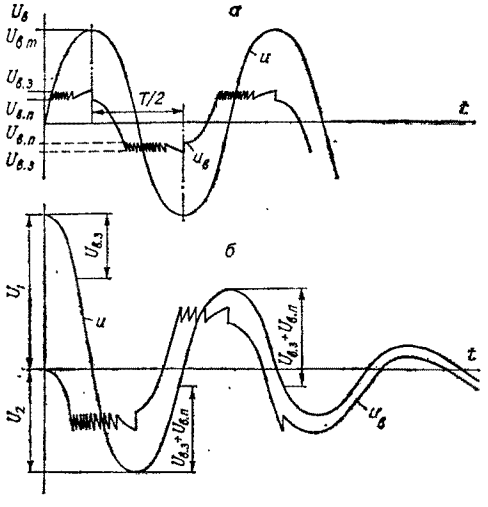


Рис. 2.4.10. Развитие во времени ЧР при переменном (*а*) и импульсном (*б*) напряжениях. $u_в$ и U — мгновенные напряжения соответственно на включении и на выводах конденсатора

$$m_{ЧР} = \frac{2U_{вm} - (U_{в.з} + U_{в.п})}{U_{в.з} - U_{в.п}} + 1 = \frac{2U_m - U_1}{\Delta U}, \qquad (2.4.10)$$

где U_m — амплитуда напряжения, приложенного к образцу; $U_{вm} = \eta U_m$. При этом число разрядов во включении $n_{ЧР}$ за одну секунду

$$n_{ЧР} = 2fm_{ЧР}, \qquad (2.4.11)$$

где f — частота приложенного напряжения.

Как следует из выражения (2.4.10), при синусоидальном напряжении число ЧР за полупериод определяется амплитудой приложенного напряжения и напряжениями зажигания и погасания ЧР.

Так как после прохождения напряжения через максимум ЧР возникают вновь после изменения напряжения на величину U_1, то дополнительные ЧР за период возможны, если в кривой воздействующего напряжения имеются провалы глубиной более U_1. Если в кривой провалов нет или они имеют меньшую глубину, то число ЧР за полупериод, а следовательно, и напряжение критических ЧР не зависят от формы этой кривой.

Форма напряжения не влияет на напряжение начальных ЧР при тех же условиях.

Зависимость характеристик ЧР от технологии изготовления. Характеристики ЧР существенно определяются технологией изготовления и прежде всего режимом термовакуумной обработки изоляции.

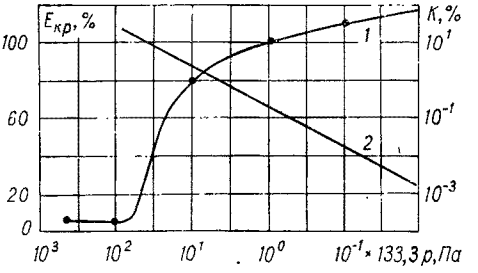


Рис. 2.4.11. Зависимость напряженности критических ЧР (*1*) бумажно-масляных конденсаторов и содержания воздуха (*2*) в масле от остаточного давления при пропитке изоляции

Поскольку при изменении режимов термовакуумной обработки обычно меняются одновременно и остаточное газосодержание, и остаточная влажность, то представляет интерес проследить влияние каждого из этих факторов в отдельности на характеристики ЧР на основании результатов специально поставленных опытов.

На рис. 2.4.11 показано влияние остаточного давления на напряженность критических ЧР и содержание воздуха для бумажной изоляции, пропитанной маслом, при влажности бумаги менее 0,1% [В.7]. Как видно, в области давлений до 10 Па для сухой изоляции наблюдается очень слабая зависимость $E_{кр}$ от остаточного давления при пропитке. Пропитка при остаточном давлении выше 10^2 Па приводит к существенному снижению напряжения критических ЧР; при остаточном давлении более 10^2 Па в изоляции после термовакуумной обработки остаются газовые включения. Следует, однако, считать недопустимым большое количество растворенного воздуха в жидком диэлектрике, так как изменения температуры могут привести к возникновению газовых включений и резкому снижению напряжения ЧР.

На рис. 2.4.12 приведены зависимости $E_{нач}$ и $E_{кр}$ от влагосодержания при пропитке бумажной изоляции конденсаторным маслом и трихлордифенилом [2.15]. При влажности бумаги более нескольких процентов по массе сильно снижается напряжение критических ЧР.

Для бумажно-масляной изоляции зависимость начальных ЧР от влажности бумаги отсутствует. Для бумажно-трихлордифениловой изоляции отмечается заметное уменьшение $E_{нач}$ с увеличением влаж-

ности. Рост влажности приводит к увеличению мощности ЧР. Изменение влажности с 10^{-3} до 2% по массе повышает мощность ЧР в 20 раз.

Приведенные данные показывают, что для получения высоких характеристик ЧР влажность изоляции силовых конденсаторов следует доводить ниже 10^{-1}% по массе для бумажно-масляной изоляции и ниже 10^{-3}% для бумажно-трихлордифениловой. Для этого необходимо, чтобы в конце термовакуумной обработки остаточное давление было порядка 0,1 Па.

Применение высокого вакуума требуется также по условиям обеспечения низкого tgδ изоляции и, кроме того, позволяет существенно снизить остаточное газосодержание изоляции (до 10^{-4}% по объему).

Влияние объемной массы бумаги на напряженности частичных разрядов. Изменение объемной массы бумаги вызывает изменение напряжений ЧР. Увеличение объемной массы бумаги, с одной стороны, приводит к увеличению электрической прочности листов бумаги, во-первых, вследствие увеличения содержания клетчатки, которое пропорционально отношению объемной массы бумаги $\gamma_б$ к плотности клетчатки $\gamma_к$; во-вторых, в результате сокращения размеров элементарных каналов в бумаге, заполненных пропитывающей жидкостью. С другой стороны, увеличение объемной массы бумаги при диэлектрической проницаемости жидкости $\varepsilon_{rж}$, меньшей диэлектрической проницаемости клетчатки $\varepsilon_{rк}$, приводит к росту диэлектрической проницаемости листа бумаги $\varepsilon_{rб}$ согласно соотношению

$$\varepsilon_{rб} = \frac{\varepsilon_{rк}\,\varepsilon_{rж}}{\varepsilon_{rк}a + \varepsilon_{rж}(1-a)}, \qquad (2.4.12)$$

где a — относительный объем, занимаемый порами;

$$a = 1 - \gamma_б/\gamma_к.$$

Возрастание диэлектрической проницаемости бумаги сопровождается увеличением напряженности в прослойках жидкого диэлектрика и приводит к снижению напряженностей ЧР. Вследствие этого влияние объемной массы бумаги по-разному сказывается на кратковременной и длительной прочности конденсаторной изоляции.

Для кратковременной прочности преобладает влияние первого фактора, способствующего ее увеличению с ростом плотности бумаги. В случае длительной прочности, для которой ЧР в прослойках жидкого диэлектрика играют определенную роль, увеличение плотности бумаги приводит к снижению напряжения (напряженности) ЧР и сокращению срока службы изоляции.

Частичные разряды при постоянном напряжении так же, как и на переменном, представляют собой пробои участков изоляции с пониженной электрической прочностью, например, газовых включений или пленок жидкого диэлектрика в слоистой изоляции. Существенное отличие в протекании процесса на постоянном напряжении заключается в том, что напряженность начальных ЧР значительно выше, чем при переменном, и что интенсивные ЧР типа критических имеют место только при включении напряжения или его изменении во времени. В результате ЧР на поверхности включений образуются поверхностные заряды из возникающих вследствие предшествующих ионизационных процессов свободных зарядов (ионов). Дополнительное поле этих зарядов с напряженностью $E_{пов}$ направлено встречно основному полю, что вызывает ослабление результирующей напряженности во включении.

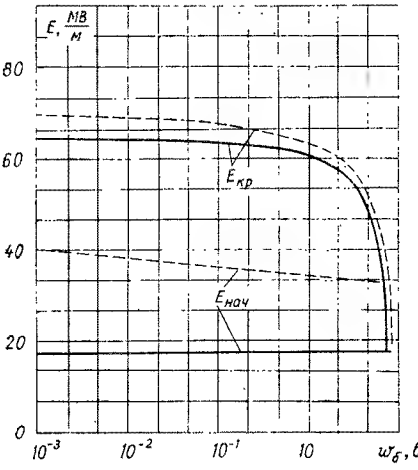


Рис. 2.4.12. Зависимость напряженностей начальных ($E_{нач}$) и критических ($E_{кр}$) ЧР от влагосодержания бумаги, пропитанной конденсаторным маслом (сплошные линии) и трихлорднфенилом (штриховые линии)

В момент погасания разряда результирующая напряженность $E_{рез}$ равна напряженности погасания $E_{в.п}$:

$$E_{рез} = E_{вн} - E_{0\,пов} = E_{в.п}, \qquad (2.4.13)$$

где $E_{0\,пов}$ — начальное значение напряженности поля, создаваемого поверхностными зарядами во включении; $E_{вн}$ — напряженность во включении, создаваемая приложенным напряжением в предположении отсутствия в нем разряда (рис. 2.4.13).

После погасания разряда происходит стекание поверхностного заряда $q_{пов}$ через проводимость бумаги и пропитывающего состава. При этом напряженность, созданная поверхностными зарядами, изменяется по закону

$$E_{пов} = E_{0\,пов}\, e^{-t/\tau_{пов}}. \qquad (2.4.14)$$

Здесь $\tau_{пов}$ — постоянная времени стекания поверхностного заряда через проводимость диэлектрика

$$\tau_{пов} = \rho_v \cdot \varepsilon_r, \qquad (2.4.15)$$

где ρ_v и ε_r — удельное объемное сопротивление и относительная диэлектрическая проницаемость изоляции соответственно.

Для установившегося значения приложенного постоянного напряжения условием повторного ЧР является равенство

$$E_{\text{о пов}}\left(1-e^{-\Delta t/\tau_{\text{пов}}}\right)= =E_{\text{в.з}}-E_{\text{в.п}}. \qquad (2.4.16)$$

Учитывая также, что при значительных величинах приложенного напряжения $E_{\text{в.п}} \ll E_{\text{вн}}$, на основании (2.4.13) получаем

$$E_{\text{о пов}} \approx E_{\text{вн}}; \qquad (2.4.17)$$

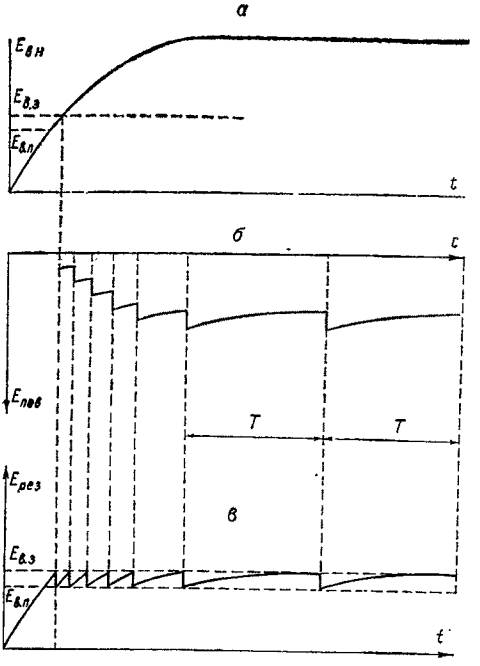


Рис. 2.4.13. Напряженности поля, создаваемые приложенным напряжением (*а*), поверхностным зарядом (*б*) и результирующая напряженность на включении (*в*) при воздействии постоянного напряжения

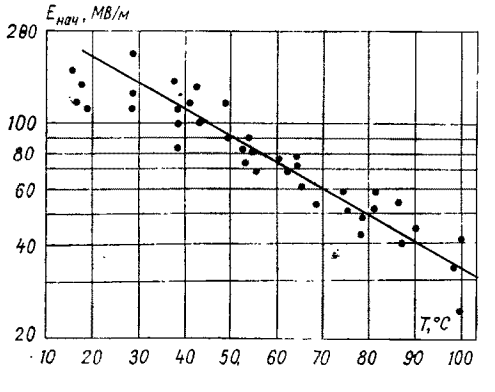


Рис. 2.4.14. Зависимость напряженности начальных ЧР от температуры при постоянном напряжении (бумага КОН-2, пропитанная конденсаторным маслом, d=80 мкм)

$$\Delta t=\tau_{\text{пов}}\frac{E_{\text{в.з}}-E_{\text{в.п}}}{E_{\text{вн}}}= =\tau_{\text{пов}}\frac{\Delta U}{U}. \qquad (2.4.18)$$

Таким образом, при заданной постоянной времени изоляции интервал между ЧР будет определяться степенью превышения приложенного напряжения U над напряжением зажигания $U_з$ или погасания $U_п$ ЧР. Обычно величина $\tau_{\text{пов}}$ при температуре 20°С составляет сотни и тысячи секунд, что приводит к интервалам между ЧР во включении порядка секунд или десятков секунд, т. е. на несколько порядков больше, чем при напряжении промышленной частоты. Это позволяет существенно увеличить допустимую рабочую напряженность в конденсаторах при постоянном напряжении по сравнению с напряжением промышленной частоты.

На постоянном напряжении даже при наличии острого края электрода ЧР развиваются по всей площади электрода, что объясняется ослаблением краевого эффекта вследствие значительной проводимости прослоек жидкого диэлектрика по сравнению с поперечной проводимостью бумажно-пропитанной изоляции. При постоянном напряжении напряженности начальных ЧР значительно выше, чем при переменном, что связано в основном с их различной интенсивностью.

Для изоляции с резко неоднородным полем на краю электрода изменение толщины диэлектрика от 30 до 300 мкм практически не сказывается на напряженности ЧР, что объясняется отсутствием краевого эффекта электродов.

При постоянном напряжении, так же, как и переменном, зависимость мощности ЧР от напряжения (напряженности) хорошо аппроксимируется формулой

$$P_{\text{ЧР}}=A_5U^{a_2}=A_6E^{a_2}, \qquad (2.4.19)$$

однако в этих зависимостях показатель степени a_2 существенно больше, чем для переменного напряжения, и колеблется от 8 до 14.

Характеристики частичных разрядов при постоянном напряжении сильно зависят от температуры изоляции. С ростом температуры уменьшается постоянная времени $\tau_{\text{пов}}$ стекания зарядов, образующихся на поверхности включения, что происходит как за счет увеличения проводимости (уменьшения объемного сопротивления), так и за счет возрастания скорости диффузии поверхностных зарядов. Это приводит к значительному росту тока ЧР с повышением температуры:

$$I_{\text{ЧР}}=I_{\text{ЧР0}}e^{b(T-T_0)}, \qquad (2.4.20)$$

где $I_{\text{ЧР0}}$ — ток ЧР при температуре T_0; $I_{\text{ЧР}}$ — ток ЧР при T; для бумажно-масляной изоляции b=0,09 К^{-1}.

При постоянном напряжении напряженность начальных ЧР значительно зависит

от температуры изоляции (рис. 2.4.14) и ее влажности [2.16].

Частичные разряды при импульсном напряжении. Во многих случаях основной причиной пробоя изоляции конденсатора, работающего в импульсном режиме, являются ЧР. Развитие ЧР в отдельных областях изоляции при импульсном напряжении принципиально не отличается от того, что имеет место при переменном синусоидальном напряжении [В.4, В.6, В.7]. При работе импульсного конденсатора в режиме колебательного разряда на нагрузку или при воздействии колебательных импульсов напряжения ЧР возникают на каждом из полупериодов приложенного напряжения в соответствии с рис. 2.4.10, *б* до тех пор, пока амплитуда напряжения на включении не станет ниже напряжения зажигания ЧР в этом включении. Число полупериодов, в которых содержатся ЧР, равно

$$n = \frac{2}{T_p \delta_p} \ln \frac{U_m}{U_з}, \qquad (2.4.21)$$

где T_p — период колебания; $\delta_p = \frac{r}{2L}$ — коэффициент затухания разрядного контура; r и L — соответственно индуктивность и активное сопротивление разрядного контура; U_m — зарядное напряжение конденсатора; $U_з$ — напряжение зажигания ЧР.

Если определять число эквивалентных полупериодов $K_э$ синусоидального напряжения с одинаковой амплитудой U_m из условия равенства числа частичных разрядов за один импульс, то

$$K_э = \frac{\sqrt{\Delta}+1}{2(\sqrt{\Delta}-1)} - \frac{n}{\Delta^{n/2}-1}, \qquad (2.4.22)$$

где Δ — декремент колебаний контура ($\Delta = e^{\delta_p T_p}$). При $U_{в.п} \ll U_{в.з}$

$$K_э = \frac{\sqrt{\Delta}+1}{2(\sqrt{\Delta}-1)}. \qquad (2.4.23)$$

Из уравнений (2.4.22) и (2.4.23) следует, что увеличение Δ значительно снижает количество ЧР за импульс и соответственно количество эквивалентных полупериодов синусоидального напряжения. Это приводит к тому, что с увеличением декремента колебаний существенно возрастает срок службы конденсатора или появляется возможность использовать его при больших рабочих напряженностях (см. § 6.2).

§ 2.5. Самовосстановление в конденсаторах

Электрическое самовосстановление. В конденсаторах в местах дефектов диэлектрика возникают локальные повышения напряженности электрического поля и концентрация тока проводимости. Если локальная напряженность достаточно велика (§ 4.6), то диэлектрик пробивается. При обкладках из металлической фольги пробой приводит к короткому замыканию обкладок и к отказу конденсатора (или секции с последовательно включенным предохранителем).

В конденсаторах с тонкими (порядка 0,01÷0,08 мкм) металлизированными обкладками (§ 3.2) такой пробой обычно не приводит к отказу вследствие *явления самовосстановления,* которое заключается в следующем [В.18, 2.17].

При пробое ток короткого замыкания, определяемый значением энергии и параметрами цепи протекания этого тока, достигает максимальной плотности в зоне пробоя диэлектрика. Возникающая электрическая дуга в канале пробоя (диаметром от единиц до сотен микрометров в зависимости от конструкции конденсатора и значения энергии разряда) приводит к образованию плазмы. В зоне пробоя создаются высокое давление и интенсивное движение плазмы и газов (продуктов разложения диэлектрика), направленное из этой зоны. Электрическая дуга продолжает гореть в расширяющейся плазме. Участок обкладок, прилегающий к месту пробоя, нагретый током короткого замыкания, испаряется. Из-за быстрого увеличения объема плазмы она охлаждается и электрическая дуга гаснет.

Вокруг места пробоя на диэлектрике образуются свободные от металла обкладок участки малой площади (от десятых долей до единиц квадратных миллиметров) — так называемые зоны деметаллизации.

Длительность протекания импульса тока при самовосстановлении составляет единицы — десятки микросекунд. Погасанию дуги способствует ограничение энергии разряда за счет различных конструктивных решений, в частности, увеличения сопротивления для тока путем деления обкладок на участки [2.18].

Качество самовосстановления, которое можно оценить по отношению сопротивлений изоляции конденсаторов после актов самовосстановления и до них, зависит от конструкции конденсатора и энергии, выделившейся в зоне самовосстановления [2.19].

При охлаждении плазмы на участках деметаллизации и в канале пробоя осаждаются вещества, некоторые из них являются токопроводящими (углерод, различные кислоты и т. д.). Количество осевшего свободного углерода, от которого зависит сопротивление изоляции, тесно связано с химическим составом диэлектрика. Наилучшим самовосстановлением обладают конденсаторы с бумажным диэлектриком, затем следуют конденсаторы с полиэтилентерефталатовым (лавсановым), поликарбонатным, полипропиленовым и полистирольным диэлектриками.

Наряду с диэлектриком на результаты самовосстановления сильно влияют вид металла обкладок, его толщина, структура металлического слоя и т. д. Так, если обкладки цинковые, то для их испарения не-

обходимо меньше энергии, чем для алюминиевых. С другой стороны, осаждающаяся после самовосстановления окись цинка является полупроводником, т. е. снижает сопротивление изоляции в зоне деметаллизации, тогда как окись алюминия является диэлектриком.

Тонкие слои металла требуют меньше энергии на испарение, однако их минимальная толщина ограничена допустимым тепловыделением в обкладках, а также условиями стойкости к импульсным токам (§ 6.1) и требованиями долговечности.

Современная техника металлизации позволяет создавать тонкие слои обкладок с микротрещинами, которые, практически не отражаясь на рабочих характеристиках конденсаторов, уменьшают энергию при самовосстановлении в результате быстрого испарения металла в этих местах и прерывания тока [2.17].

В целом металлизированные конденсаторы проектируются и изготавливаются таким образом, чтобы при пробое диэлектрик повреждался минимально, а зона деметаллизации имела большое сопротивление изоляции и малую площадь.

У конденсатора со значительным запасом энергии или же работающего в составе батареи диэлектрик при пробое и испарении повреждается сильнее вследствие больших значений токов разряда. Это создает предпосылки для последующих пробоев и снижения качества самовосстановления.

Свойство самовосстановления конденсаторов с металлизированными обкладками используется в основном для устранения дефектных мест при производстве. Так как образующиеся при самовосстановлении продукты разложения диэлектрика и обкладок ухудшают электрические характеристики конденсаторов (см. ниже), то при производстве эффективна тренировка лент металлизированного диэлектрика до намотки секций. Тренируют также и готовые конденсаторы, подбирая режим тренировки таким, чтобы дефекты устранялись при минимальном ухудшении характеристик конденсаторов.

Однако даже при сохранении работоспособности конденсаторы с металлизированными обкладками при большом числе актов самовосстаиовления изменяют свои параметры и характеристики. В результате деметаллизации уменьшаются площадь обкладок и соответственно емкость конденсатора. Допустимое число актов самовосстановления зависит от номинального значения емкости, допустимого ее изменения, а также площади зоны деметаллизации. Полагая, что площадь зоны деметаллизации не зависит от числа актов самовосстановления, число этих актов равно [В.18]:

$$N = \frac{\Delta C}{C_н} \cdot \frac{d 10^5 C_н}{\varepsilon_r S_1 \cdot 1{,}77},$$

где S_1 — площадь зоны деметаллизации, мм^2; $C_н$ — начальная емкость конденсатора, мкФ; ε_r — отиосительная диэлектрическая проницаемость; d — толщина диэлектрика, мкм.

Расчеты по приведенной формуле показывают, что изменение емкости бумажного конденсатора на 10%, имеющего $C_н = 1{,}0$ мкФ, происходит после актов самовосстановления ($N \approx 1{,}3 \cdot 10^4$) при $S_1 = 10$ мм^2, $d = 8$ мкм и $\varepsilon_r = 3{,}5$.

В результате актов самовосстановления не только падает емкость конденсатора, но и уменьшается сопротивление изоляции и увеличивается tgδ (§ 4.1). Рост tgδ в металлобумажных конденсаторах из-за самовосстановления становится значительным только после нескольких тысяч пробоев [В.18]. В металлопленочных конденсаторах это число существенно ниже. Увеличение tgδ конденсаторов и более резкая зависимость его от температуры являются одной из главных причин выхода из строя металлизированных конденсаторов, работающих при переменном напряжении, так как с ростом tgδ у них проявляется тепловая нестабильность и происходит тепловой пробой (§ 4.5).

Электрохимическое самовосстановление. Для того, чтобы произошел акт электрического самовосстановления, необходимо возникновение пробоя диэлектрика, однако нередко металлизированные конденсаторы работают при напряжениях значительно ниже номинального. В этих случаях в слабых местах возникают повышенные сквозные токи (см. § 2.2), приводящие к электрохимическому окислению металла обкладок, наиболее интенсивному в зоне, близкой к дефекту. Металл обкладок, окисляясь, превращается в плохо проводящие ток вещества (полупроводники и диэлектрики), в связи с чем дефектные места электрически изолируются [В.30, 2.17].

Наиболее благоприятные условия для электрохимического самовосстановления существуют у конденсаторов с алюминиевыми обкладками при повышенных температурах, наличии влаги и в случае, если ток, протекающий через дефектное место, на начальном этапе не достигает чрезмерно больших значений.

Электрохимическое самовосстановление имеет место не только в конденсаторах с органическим диэлектриком, но и в конденсаторах с оксидным диэлектриком (§ 3.4), в частности в оксидно-полупроводниковых.

Так, в танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторах в дефектных местах (сквозные поры, локальные утонышения диэлектрика и т. д.) под действием тока возникаст локальное повышенне температуры и переносятся ионы тантала, которые окисляются кислородом твердого электролита (полупроводника MnO_2). В результате дефектное место заполняется оксидом тантала, являющимся диэлектриком.

При большом значении тока в дефектном месте резко повышается температура, разрушается слой диэлектрика и образуются места устойчивого необратимого короткого замыкания. Поэтому для обеспечения самовосстановления таких конденсаторов между ними и источником энер-

гии рекомендуется включать резистор с сопротивлением порядка нескольких ом на один вольт номинального напряжения [ОСТ 11.074.011-79].

§ 2.6. Шумы в конденсаторах

В конденсаторах при воздействии напряжения возникают электрические и акустические шумы. Электрические шумы можно разделить на микро- и макрошумы. Микрошумы не превышают десятков—сотен микровольт и связаны с ЧР (см. § 2.4) и флуктуациями полного тока конденсатора. Макрошумы могут достигать десятых долей вольт и вызываются явлениями самовосстановления (см. § 2.5) и мерцаниями емкости в металлизированных конденсаторах, а также пьезоэлектрическим эффектом в некоторых низкочастотных керамических конденсаторах и варикондах.

Мерцание емкости — это скачкообразные изменения емкости конденсаторов случайного характера. Подобное явление возникает у конденсаторов с обкладками, нанесенными методом вжигания серебра или испарением в вакууме, находящимися под напряжением. Изменения емкости, возрастающие при увеличении рабочего напряжения, могут достигать 10^{-4} номинального значения емкости конденсатора. Мерцание емкостн обусловлено тем, что края таких обкладок нечеткие и состоят как бы из отдельных островков. Между ними и сплошной частью обкладки прн подаче рабочего напряжения на конденсатор возникают микродуги, соединяющие их вместе [В.1].

Мерцание емкости имеет место в низкочастотных стеклянных, стеклокерамических, керамических, а также слюдяных конденсаторах. Кроме изменения емкости это явление вызывает дополнительные потери энергии в конденсаторах.

Шумы, появляющиеся в результате мерцания емкости, содержат широкий спектр частот.

В некоторых типах низкочастотных керамических конденсаторов, для изготовления которых используется сегнетокерамика, электрические шумы могут возникать из-за механических воздействий (в основном из-за ударов) в результате пьезоэффекта. Это шумы импульсного характера.

Кроме электрических шумов в ряде типов конденсаторов имеются акустические шумы, которые обусловлены вибрациями обкладок и электрострикционным эффектом. Заметный акустический шум возможен у непропитанных конденсаторов и конденсаторов с твердой пропиткой (в частности, с эпоксидными компаундами) при воздействии на них синусоидального и особенно несинусоидального напряжений звуковых частот. Вибрации обкладок возникают под действием кулоновских и электродинамических сил.

Акустический шум достигает максимума при частотах воздействующего напряжения, близких к частотам механического резонанса обкладок или конденсатора (для конденсаторов с твердой пропиткой). Повышенный акустический шум непропитанных конденсаторов связан с неплотной намоткой слоев секции.

Электромеханические явления в конденсаторах обуславливают не только акустические шумы, в ряде случаев соизмеримые с шумами электромагнитных элементов устройств, но и старение металлизированных обкладок.

В конденсаторах с фольговыми обкладками их вибрации приводят к механическому повреждению диэлектрика и преждевременному его пробою.

Глава 3. Материалы и конструкции конденсаторов

§ 3.1. Материалы конденсаторостроения и их свойства

Применяемые для изготовления конденсаторов материалы [3.1, 3.2] совместно с конструкцией определяют свойства, характеристики и качество конденсаторов.

Изоляцией между обкладками в конденсаторах служат твердые, жидкие и газообразные диэлектрики, а также их комбинации. Тип рабочего диэлектрика определяется значениями рабочих частот, напряжений, температур и другими факторами, в том числе экономическими.

Большая часть конденсаторов выпускается с твердыми диэлектриками органического происхождения: бумагой, синтетическими пленками, а также с комбинированными диэлектриками — бумажно-пленочными и бумажными с пропиткой жидкостями.

Конденсаторная бумага, несмотря на появление ряда синтетических органических пленок, является одним из основных видов твердого органического диэлектрика, применяемого в конденсаторостроении. Это объясняется не только удачным сочетанием электрических и механических характеристик данного диэлектрика, но и его относительно дешевой и практически неограниченной сырьевой базой.

Основой бумаги является клетчатка — целлюлоза (85—95%)—полимерный углеводород ($C_6H_{10}O_5$), молекулы которого имеют вид длинных цепей. В молекуле клетчатки содержатся три гидроксильные группы ОН, что определяет ее полярность, гигроскопичность и относительно высокую диэлектрическую проницаемость.

Для изготовления конденсаторов используется специальная конденсаторная бумага, отличающаяся малой толщиной (5—30 мкм), высокой плотностью и незначительным содержанием неорганических загрязнений. По объемной массе в СССР выпускается четыре вида конденсаторных бумаг: КОН-0,8 с объемной массой 800 кг/м³, КОН-1 — 1000 кг/м³, КОН-2 — 1200 кг/м³, КОН-3 — 1300 кг/м³. Бумага

КОП-0,8 и КОН-1 преимущественно применяется в конденсаторах с повышенным значением ресурса, предназначенных для работы на переменном напряжении, а КОН-2 и КОН-3 — в основном в конденсаторах, работающих на постоянном напряжении.

В силовых конденсаторах используются все выпускаемые плотности бумаг и бумаги со специальными характеристиками (АНКОН, МКОН, ОМКОН), обладающие меньшими диэлектрическими потерями и более пологими зависимостями тангенса угла потерь от температуры.

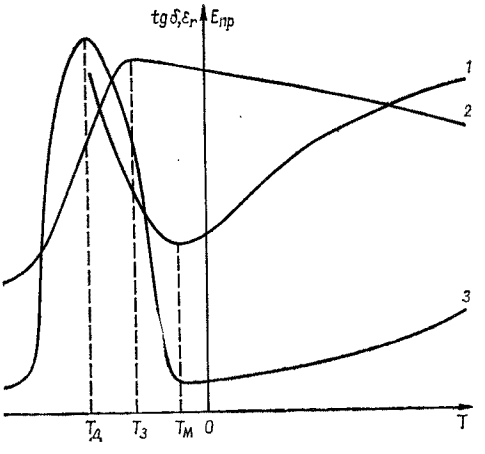


Рис. 3.1.1. Зависимость от температуры кратковременной электрической прочности (*1*), относительной диэлектрической проницаемости (*2*) и тангенса угла диэлектрических потерь (*3*) для полярной жидкости

Бумаги с повышенной объемной массой имеют более высокие электрическую прочность и значения тангенса угла потерь. В связи с этим они обычно применяются в конденсаторах низкого напряжения, в которых секции наматываются из одно- и двухслойных лент диэлектрика.

Конденсаторная бумага имеет высокую механическую и электрическую прочность: временное сопротивление разрыву непропитанной бумаги составляет 108 Н/м^2; кратковременная электрическая прочность для непропитанной бумаги — от 30 до 50 МВ/м. Число токопроводящих включений (ТПВ) резко зависит от толщины бумаги: для тонких бумаг (5—8 мкм) оно в пределах 100÷900 на 1 м^2, для более толстых — 20÷100 на 1 м^2. Тангенс угла диэлектрических потерь сухой бумаги при 100°С составляет $35\cdot10^{-4}$. Сухая непропитанная бумага содержит 20—30% воздуха по (объему) и 5—7% воды (по массе). Для улучшения электрических характеристик бумаги проводят тщательную сушку ее под вакуумом для удаления влаги и последующую пропитку жидким диэлектриком. Для пропитанной бумаги пробивная напряженность электрического поля составляет 150—200 МВ/м.

Таблица 3.1.1

T, °С	Количество лет	T, °С	Количество лет
80	1200	100	95
85	650	105	50
90	350	110	28
95	180	115	14

Электрофизические параметры клетчатки, измеренные при 20°С и частоте 50 Гц, следующие: относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_r=5—7$; плотность $\gamma_к=(1{,}50—1{,}55)\cdot10^3$ кг/м^3; $\mathrm{tg}\delta_к=(1{,}6—1{,}7)\cdot10^{-3}$. Опыт проектирования бумажных конденсаторов показал, что хорошее совпадение расчетных и опытных данных получается при $\varepsilon_r=6{,}5$ и $\gamma_к=1{,}55\times\times10^3$кг/м^3. Расчетные и опытные данные по tgδ бумаги имеют значительное расхождение в связи с тем, что на него влияет не только $\mathrm{tg}\delta_к$, но и другие факторы. В области температур (—80)÷(—90)°С при $f=50$ Гц $\mathrm{tg}\delta_к$ имеет максимум, значение которого примерно на порядок выше его значения при 20°С. С увеличением частоты максимум смещается в сторону повышения температуры. С понижением температуры ε_r уменьшается, и в области от —60 до +100°С при $f=50$ Гц закон уменьшения диэлектрической проницаемости близок к линейному и хорошо описывается эмпирической формулой [3.3]:

$$\varepsilon_r=\varepsilon_{r20}[1+\alpha_к(T—20)], \qquad (3.1.1)$$

где ε_{r20} — диэлектрическая проницаемость клетчатки при 20°С; $\alpha_к=5\cdot10^{-4}$К$^{-1}$ — опытная постоянная для температур от —60 до +100°С; T — температура, °С. Значение ε_r пропитанной бумаги можно рассчитать по формуле (2.4.12).

Под длительным действием температуры происходит снижение степени полимеризации клетчатки или ее термическая деструкция, имеющая следствием ухудшение механических и электрических характеристик бумаги. Время, необходимое для снижения степени полимеризации от 1000—2000 до 150 при термическом старении в вакууме с начальной влажностью 0,03%, приведено в табл. 3.1.1 [3.4].

Пропиточные составы. В современном конденсаторостроении для пропитки конденсаторов используется большой ассортимент пропиточных составов. По консистенции они могут быть жидкими, полужидкими и твердыми, по электрическим свойствам — полярными и неполярными. Основные электрофизические характеристики наиболее распространенных пропиточных материалов представлены в табл. 3.1.2.

Полярные жидкости имеют более высокие ε_r и tgδ и сильную зависимость от температуры и частоты. На рис. 3.1.1 приведены типичные зависимости от температуры ε_r, tgδ и $E_{пр}$ полярной жидкостн. Температуре $T_д$ соответствует дипольный максимум tgδ, $T_м$ — минимум tgδ и $E_{пр}$, ниже температуры $T_з$ начинается резкое снижение ε_r. Абсолютные значение $T_д$, $T_м$ и $T_з$ зависят от природы жидкости, но их

Таблица 3.1.2

Пропитывающий материал	Плотность, 10^3 кг/м³	Температура застывания, °С	Электрические параметры (f = 1000 Гц): ε_r	$10^4 \cdot \mathrm{tg}\delta$	ρ_v, Ом·м при 100°С	$E_{пр}$, МВ/м при 20°С	Преимущественная область применения
Жидкие и полужидкие неполярные:							
нефтяное масло	0,86—0,89	—45	2,1—2,3	2	10^{11}	20	Силовые конденсаторы (деление напряжения, отбора мощности, связи для повышения коэффициента мощности)
вазелиновое масло	0,87—0,89	—5	2,1—2,4	2	10^{11}	20	Конденсаторы с металлизированными обкладками для работы на постоянном и переменном напряжениях
вазелин	0,83—0,89	+40	2,1—2,2	2—3	10^{10}	20	То же
откол	0,86—0,87	—12	2,0—2,2	1	10^{11}	20	» »
Жидкие полярные:							
касторовое масло	0,95—0,97	—15	4,2—4,7	10—15	$2 \cdot 10^8$	20	Импульсные конденсаторы, конденсаторы постоянного напряжения
трихлордифенил	1,38	—18	5,9	5—10	$5 \cdot 10^9$	18	Силовые конденсаторы
Твердые неполярные:							
парафин	0,85—0,92	+50	2,1—2,2	3—7	$2 \cdot 10^{10}$	—	Конденсаторы для работы на постоянном напряжении
церезин	0,88—0,95	+65	2,2—2,5	3—5	$5 \cdot 10^{10}$	—	То же
синтетический церезин	0,90—0,96	+100	2,4—2,6	3—5	$5 \cdot 10^{10}$	—	» »
Твердые полярные:							
головакс	1,5—1,6	+130	4,5—5,0	5—20	10^9	—	» »
поливинилкарбазол	1,2	+150	3	7—10	10^{12}	—	» »
эпоксидная смола	1,1—1,2	+125	3,7—4,0	50—80	10^{11}	—	Конденсаторы для работы на постоянном и переменном напряжениях
компаунд МБК	1,06	+140	3,5	30—50	10^{11}		То же

взаимное расположение друг относительно друга неизменно у всех полярных жидкостей и связано соотношениями: $T_м = T_д + 30°$ и $T_з = T_д + 15°$. Зависимость ε_r от температуры при $T > T_з$ можно выразить формулой, аналогичной (3.1.1):

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{r20}[1 - \alpha_ж (T - 20)],$$

где ε_{r20} — относительная диэлектрическая проницаемость жидкости при 20°С.

Для нефтяного масла коэффициент $\alpha_ж = (5 \div 6) \cdot 10^{-4} К^{-1}$, для трихлордифенила $1{,}9 \cdot 10^{-3} К^{-1}$, для касторового масла $9 \cdot 10^{-3} С^{-1}$. Пропитка трихлордифенилом допускает работу конденсаторов при температуре от —40°С и выше. При застывании (при температурах ниже —40°С) трихлордифенил переходит в хрупкое стеклообразное состояние и при усадке может повредить твердую фазу диэлектрика. Поэтому включение под напряжение конденсаторов, длительное время находившихся при температурах ниже — 40°С, без предварительного нагрева не допускается. Застывший трихлордифенил имеет низкое значение ε_r, которое вновь восстанавливается при переходе его в жидкое состояние после нагрева.

Таблица 3.1.3

Материал	Плотность, 10^3 кг/м³	Прочность на разрыв, МН/м²	Толщина, мкм	Максимальная рабочая температура, °С	Диэлектрическая проницаемость ε_r	tgδ при 10^3 Гц	ρ_v, Ом·м	Среднее значение $E_{пр}$, МВ/м при 50 Гц
Неполярные пленки								
Полистирол	1,05	6—9	10—100	70	2,5—2,6	$2\cdot10^{-4}$	10^{17}	150—200
Полипропилен	0,90	12—18	6—30	100	2,2—2,3	$7\cdot10^{-4}$	10^{15}	300—400
Политетрафторэтилен	2,15	1,6—3,0	6—30	250	2,0—2,1	$1\cdot10^{-4}$	10^{16}	200 (два слоя)
Полярные пленки								
Полиэтилентерефталат (лавсан)	1,40	20—40	2—30	125	3,2	$4\cdot10^{-3}$	10^{16}	200—350
Поликарбонат	1,20	10—15	2—20	125	3,0	$1\cdot10^{-3}$	10^{15}	180—250
Триацетатцеллюлоза	1,20	9—12	1,5—3,0	85	3,5—3,7	$7\cdot10^{-3}$	$5\cdot10^{4}$	180—150

Важными положительными качествами трихлордифенила являются его негорючесть, высокая химическая стабильность и газостойкость. Для пропитки конденсаторов, предназначенных для работы в условиях холодного климата, разработаны синтетические маловязкие жидкости с низкой температурой застывания (до —50°С). Помимо токсичности трихлордифенил очень устойчив к разрушению естественным путем (биодеградацией). При попадании в окружающую среду происходит его накопление. Поэтому при работе с трихлордифенилом должны строго соблюдаться меры предосторожности и недопущение попадания его в окружающую среду.

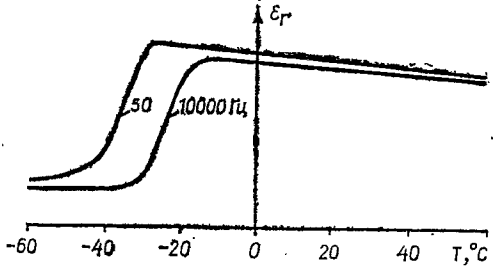


Рис. 3.1.2. Влияние частоты и температуры на относительную диэлектрическую проницаемость бумажного диэлектрика, пропитанного трихлордифенилом

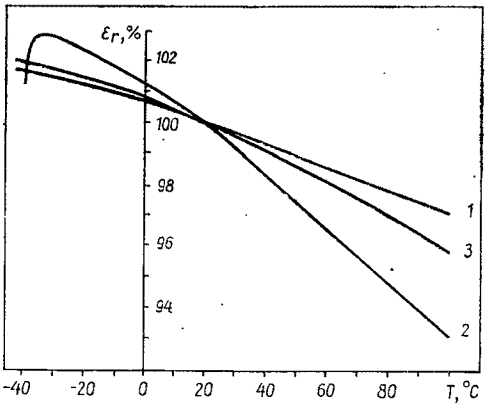


Рис. 3.1.3. Зависимость ε_r от температуры бумажного диэлектрика, пропитанного нефтяным маслом (*1*), трихлордифенилом (*2*), касторовым маслом (*3*)

Для повышения ресурса конденсаторов, пропитанных трихлордифенилом, в них вводят стабилизирующие добавки (обычно это эпоксидные соединения при переменном напряжении и атрахинон — при постоянном), связывающие продукты разложения трихлордифенила.

Влияние частоты и температуры на ε_r бумажного диэлектрика, пропитанного трихлордифенилом, показано на рис. 3.1.2. Температурные зависимости ε_r бумажного диэлектрика, пропитанного нефтяным и касторовым маслом и трихлордифенилом, для частоты 50 Гц приведены на рис. 3.1.3.

Органические полимерные пленки. Органические синтетические полимерные пленки, используемые в качестве диэлектрика в конденсаторах, делятся на два основных вида: неполярные и полярные. Неполярные имеют малые значения ε_r и tgδ, слабо зависящие от частоты и температу-

Таблица 3.1.4

Пределы ε_r (20°С; f=1мГц)	Пределы ТКε (10^6 К$^{-1}$)	Обозначение группы по ТКε
230—400	—3300±1000	М3300
130—190	—1300± 200	М1300
65—100	—750± 100	М750
45— 65	—470± 90	М470
40—600	—330± 60	М330
35— 50	—220± 40	М220
30— 45	—150± 40	М150
17— 55	—75± 30	М75
17— 50	—47± 20	М47
17— 45	—33± 20	М33
17— 40	0± 20	МПО
12— 35	+33± 20	П33

ры, поэтому конденсаторы с таким диэлектриком могут использоваться при высоких частотах. Они обладают также малым коэффициентом абсорбции. Однако для них характерны небольшие значения диэлектрической проницаемости (см. табл. 2.1.1), что приводит к снижению удельной емкости (см. § 4.7). Основные неполярные пленочные материалы, применяемые в конденсаторах в качестве диэлектрика,— это полистирол (ПС), полипропилен (ПП), политетрафторэтилен (ПТФЭ).

Полярные пленки характеризуются относительно большими потерями, резко зависящими от частоты и температуры, поэтому конденсаторы из них предназначаются для работы при постоянном напряжении или переменном небольшой частоты. Основными полимерными пленочными полярными материалами, нашедшими применение в конденсаторостроении, являются: полиэтилентерефталат (ПЭТФ), поликарбонат (ПК — слабополярный материал), триацетат целлюлозы (ТАЦ).

Некоторые электрофизические характеристики пленочных диэлектриков представлены в табл. 3.1.3.

Керамические материалы. Особенностью керамических материалов, используемых для изготовления конденсаторов, является прежде всего большое разнообразие значений относительной диэлектрической проницаемости (ε_r) и температурного коэффициента диэлектрической проницаемости (ТКε). Значение ε_r колеблется в пределах от нескольких единиц до нескольких тысяч, а величина ТКε может иметь как большие отрицательные и положительные значения, так и значения, близкие к нулю. Широкий диапазон значений ε_r позволяет изготовлять керамические конденсаторы с номинальными значениями емкостей от долей пикофарады до нескольких микрофарад при сравнительно небольших габаритах.

Керамические материалы в соответствии с их свойствами разделяются на три типа. К первому относятся высокочастотные материалы с ε_r выше 12 (табл. 3.1.4). Поскольку керамические конденсаторы выпускаются только с металлизированными электродами, а коэффициент линейного расширения у них мал, можно считать, что ТКЕ ≈ ТКε. Угол потерь у этого типа керамики мал и при температуре +20°С и частоте 1 мГц $\mathrm{tg}\delta$, как правило, не превышает $6 \cdot 10^{-4}$. Удельное объемное сопротивление при 155°С не менее 10^8—10^9 Ом·м. На рис. 3.1.4 и 3.1.5 показан характер изменения емкости конденсаторов в зависимости от температуры для различных групп ТКЕ. Указанные в табл. 3.1.4 керамические материалы представляют главным образом системы на основе цирконатов и титанатов кальция.

Ко второму типу керамических материалов относятся низкочастотные материалы с величиной $\varepsilon_r > 900$ (табл. 3.1.5). Материалы этого типа представляют собой сегнетокерамику, обладающую доменной поляризацией. Для них характерна сильная зависимость ε_r от температуры и напряженности поля, а также большие потери ($\mathrm{tg}\delta \approx (2—5) \cdot 10^{-2}$). Для керамики второго типа имеет место нелинейная зависимость ε_r от температуры. На рис. 3.1.6,*а—г* показан характер изменения емкости конденсаторов, изготовленных из керамики второго типа, в зависимости от температуры.

Таблица 3.1.5

ε_r, не менее	$\Delta\varepsilon_r$, % (Т—(—60)÷(+85)°С)	Обозначение группы по ТКε
1400	±10	Н10
2000	±20	Н20
2500	±30	П30
3000	±50	Н50
4000	±70	Н70
8000	±90	Н90

Материалы третьего типа — это полупроводниковая сегнетокерамика. Диск из массы на основе $BaTiO_3$ или TiO_2 подвергается обжигу в восстановительной среде и превращается в полупроводник. С наружной поверхности диска производится окисление, создающее тонкий слой диэлектрика. На окисленную поверхность наносятся металлические электроды. Эффективное значение диэлектрической проницаемости может достигать нескольких сотен тысяч. Конденсаторы из такой керамики

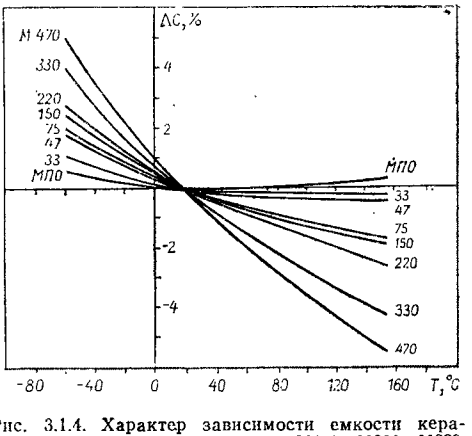


Рис. 3.1.4. Характер зависимости емкости керамических конденсаторов групп М470, М330, М220, М150, М75, М33, МПО от температуры

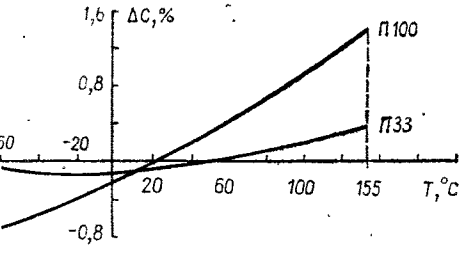


Рис. 3.1.5. Характер зависимости емкости керамических конденсаторов групп П33 и П100 от температуры

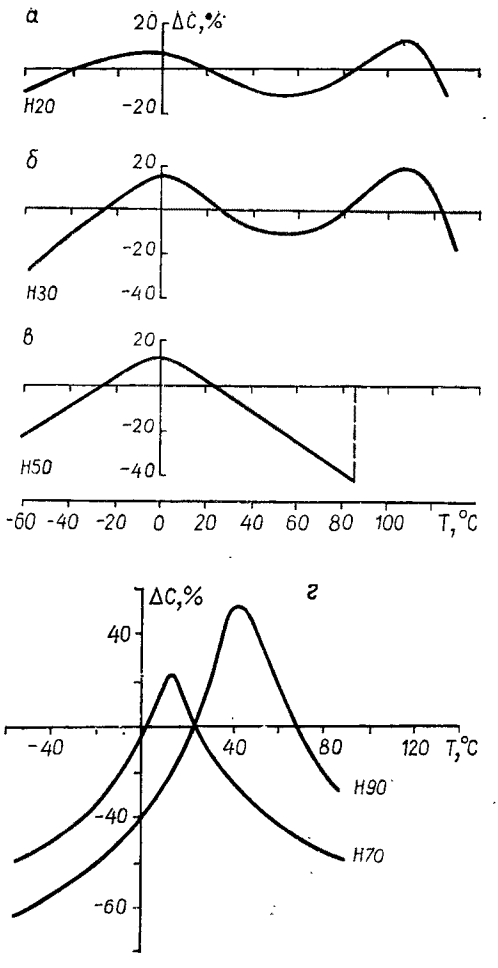


Рис. 3.1.6. Характер температурной зависимости емкости керамических конденсаторов различных групп: *а*—Н20; *б*—Н30; *в*—Н50; *г*—Н70 и Н90

изготовляются только на низкие напряжения (не выше 50 В). По допустимому изменению емкости в интервале рабочих температур они относятся к ненормируемым по ТКЕ группам (Н20, Н50, Н70, Н90; см. § 1.4 и 4.1).

Стекломатериалы. Основным материалом, который используется для изготовления стеклянных и стеклокерамических конденсаторов, является силикатное стекло — прозрачный материал, обладающий большими технологическими преимуществами по сравнению с чистым плавленым кварцем. Из большого количества разнообразных сортов силикатного стекла наиболее широко используется боросиликатное щелочное стекло. Его диэлектрическая проницаемость 5,0—7,5; $ТК\varepsilon = +(300—500)\cdot 10^{-6}К^{-1}$; $tg\delta = (20—60)\cdot 10^{-4}$. Как конденсаторный диэлектрик стекло применяется в виде тонких пленок толщиной 25—50 мкм (стеклопленочные конденсаторы), стеклоэмали, а также стеклокерамики. В последнем случае в состав стеклоэмали добавляют измельченную керамику первого типа с высоким значением ε_r. Это дает возможность улучшить удельные параметры конденсаторов (см. § 4.7).

Конденсаторная слюда. Слюда представляет собой природный материал, способный расщепляться на тонкие пластинки с достаточно высокой механической и электрической прочностью и относительно высоким значением ε_r. По химическому составу различные виды слюды представляют собой водные алюмосиликаты. Важнейшими из них являются мусковит и флогопит, причем первый обладает лучшими электрическими свойствами. Диэлектрическая проницаемость мусковита 6,5—7,0, флогопита 5—6; тангенс угла потерь мусковита $(1,0—1,5)\cdot 10^{-4}$, флогопита $(10—100)\cdot 10^{-4}$. Слюда легко смачивается водой, а потому с повышением влажности воздуха ее удельное поверхностное сопротивление падает с 10^{14} до 10^9 Ом.

Материалы для оксидных конденсаторов. Качество оксидных конденсаторов во многом зависит от чистоты исходных сырьевых материалов. Так, в оксидно-электролитическом алюминиевом конденсаторе диэлектриком служит слой окиси алюминия, образующийся на аноде. Присутствие в алюминиевой фольге других металлов, не дающих при соединении с кислородом диэлектрических окислов, создает в изоляции конденсатора проводящие мостики, которые могут приводить к увеличению тока утечки вплоть до короткого замыкания. Наиболее опасным является присутствие железа, кремния и меди.

В производственной практике для конденсаторов широкого применения используется алюминиевая фольга с содержанием алюминия не менее 99,95%, а для наиболее ответственных типов конденсаторов — не менее 99,99%. Немаловажное значение для качества конденсаторов имеет состояние поверхности фольги. Присутствие на поверхности загрязнений в виде углерода, жиров, масел, а также механических дефектов в виде царапин ухудшает электрические характеристики конденсаторов. Требования к катодной фольге менее жестки — содержание алюминия в ней допустимо до 99,6%. Серьезные требования предъявляются к чистоте волокнистых прокладок (бумаги, шелка и т. д.). Для увеличения активной поверхности анода алюминиевая фольга подвергается травлению в растворах, содержащих соляную кислоту или ее солн. Последние разработки оксидно-электролитических алюминиевых конденсаторов изготовляются из фольги, имеющей удельную емкость 0,17 Ф/м² при формовочном напряжении 30 В и 0,0029 Ф/м² с напряжением формовки 450 В.

Для изготовления анодов объемно-пористых и оксидно-полупроводниковых конденсаторов используются танталовые, ниобиевые и алюминиевые порошки. К химическому составу и физическим свойствам этих порошков предъявляются жесткие требования и прежде всего — отсутствие посторонних примесей металлов (титана, железа, меди и др.), кальция, кремния, уг-

Таблица 3.1.6

Металл	Температура плавления, °С	Плотность, т/м³	Относительная емкость на единицу	
			поверхности	массы
Тантал	2980	16,6	1,0	1,00
Ниобий	2410	8,6	1,3	2,50
Алюминий	660	2,7	0,4	2,46

лерода, кислорода и азота. При достаточно высокой температуре спекания анодов происходит их частичная очистка от загрязняющих примесей. Наличие примесей приводит к увеличению тока утечки, снижению показателей надежности конденсаторов. Существенное влияние на электрические характеристики конденсаторов оказывают и размеры зерен порошка. При одной и той же температуре спекания анодов, обеспечивающей точечный контакт между зернами, емкость анода данного размера обратно пропорциональна диаметру зерна. Промышленные порошки, применяемые при изготовлении объемно-пористых анодов, имеют сложный фракционный состав; типичными являются порошки, содержащие 40—50% зерен с размерами от 3 до 30 мкм, 40—50% с размерами 30—60 мкм и 5—10% с размерами 60—90 мкм. В целях улучшения температурно-частотных характеристик целесообразно смещать распределение частиц в сторону бо́льших размеров. При оценке вентильных металлов, используемых в качестве анодов оксидных конденсаторов, помимо доступности и стоимости учитывают их температуру плавления, плотность, относительную емкость на единицу массы и, наконец, электрические параметры конденсаторов и их стабильность. Некоторые характеристики вентильных металлов и конденсаторов на их основе приведены в табл. 3.1.6.

§ 3.2. Конструкции конденсаторов с твердым органическим диэлектриком

Конструкции конденсаторов характеризуются большим разнообразием, обусловленным широким спектром условий работы конденсаторов и соответственно требованиями, предъявляемыми к ним. Разнообразие конструкций достигается использованию различных диэлектрических и проводниковых материалов, а также за счет различных конструктивных решений элементов и узлов конденсаторов [В.1, В.4, В.6, 3.5—3.20].

Отечественная промышленность изготавливает конденсаторы с твердым органическим, неорганическим, оксидным, жидким и газообразным диэлектриками. Конденсаторы с использованием последних двух типов диэлектрика выпускаются, как правило, в качестве образцовых или для специальных целей и широкого применения в электронной технике не нашли. Для силовых конденсаторов используются в основном твердые органические диэлектрики с жидкой пропиткой.

Каждая из групп конденсаторов (см. § 1.3) имеет свою основную специфическую характеристику конструкции, которая зависит от типа диэлектрика. Так, конденсаторы с твердым органическим диэлектриком благодаря его эластичности и высокой механической прочности выполняются в виде спирально намотанных рулонных секций.

Конденсаторная секция представляет собой рулон, намотанный из чередующихся в определенной последовательности лент диэлектрика (бумаги или пленки) и лент фольги (для фольговых конденсаторов) или лент металлизированной бумаги (или пленки). В зависимости от диаметра намоточной оправки секция может быть цилиндрической (намотка производится на оправку малого диаметра, как правило, 1,5—3,0 мм) или плоскопрессованной (намотка на оправку диаметром 7—50 мм и более). Цилиндрическая секция определяет цилиндрическую форму конденсатора. Как правило, конденсаторы такой формы состоят из одной секции. Плоскопрессованная секция определяет форму прямоугольного конденсатора.

Конденсатор может состоять из одной или нескольких секций, соединенных по определенной электрической схеме (параллельно, последовательно, последовательно-параллельно), в зависимости от заданных значений номинальных емкостей и напряжений конденсаторов.

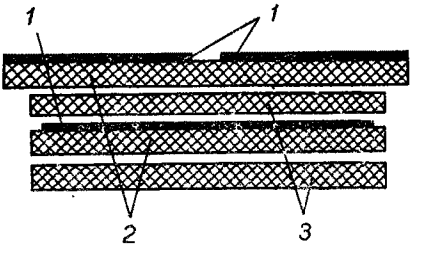


Рис. 3.2.1. Схема конструкции секций с двумя подсекциями, включенными последовательно (секция конденсаторов К75-10 на $U_н$ =500 В): 1 и 1′ — обкладки (слои металлизации); 2 — бумажный диэлектрик; 3 — лавсановая пленка

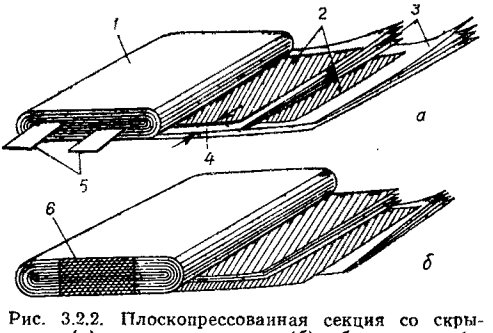


Рис. 3.2.2. Плоскопрессованная секция со скрытыми (*а*) и выступающими (*б*) обкладками: *1*—секция; *2*—обкладка; *3*—диэлектрик; *4*—закраина; *5*—вкладные выводы; *6*—контактный узел

Последовательное соединение подсекций осуществляется также бесконтактным путем. На рис. 3.2.1 показана секция с двумя последовательно соединенными с помощью «холостой» (или «плавающей») обкладки подсекциями. Такая конструкция применена для конденсаторов типа К75-10, у которых подсекции рассчитаны на 250 В действующего значения напряжения [3.5].

Секции бывают с фольговыми, металлизированными и комбинированными обкладками. Обкладки в свою очередь могут быть скрытыми и выступающими (или выпущенными). Края скрытых обкладок не выступают за края лент диэлектрика (рис. 3.2.2, *а*), тогда как выпущенные обкладки с разных сторон выступают за края лент диэлектрика (рис. 3.2.2, *б*).

Металлизированные обкладки представляют собой тонкие (десятые и сотые доли микрометра) слои металла (цинка, алюминия и других легкоплавких металлов), напыленные в вакууме либо на ленты рабочего диэлектрика, либо на ленты диэлектрика (бумаги, лавсана), используемого в качестве механической основы (мягкие обкладки). Малая толщина металлизированных обкладок позволяет улучшить удельные характеристикн конденсаторов за счет меньших объема и массы обкладок. Прн соответствующей толщине слоя металлизации (порядка 0,04—0,08 мкм) такие обкладкн могут придавать конденсаторам свойство самовосстановлення (см. § 2.5). Недостатком секций с металлизнрованными обкладками являются их более низкие теплопроводность, долговечность, стабильность параметров и стойкость к воздействию импульсных токовых нагрузок по сравнению с фольговыми обкладками.

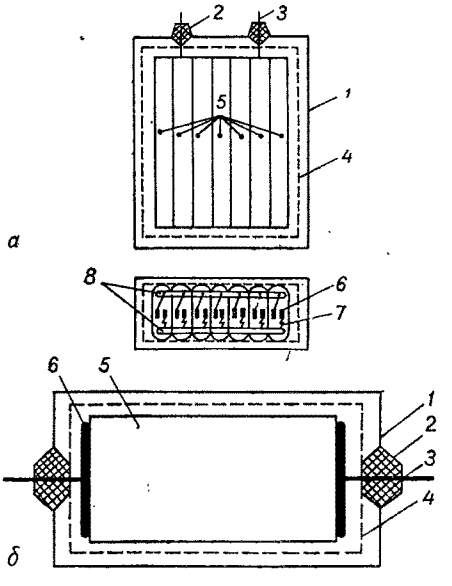


Рис. 3.2.3. Схема конструкцин многосекцнонного конденсатора с плоскопрессованными секциями в призматическом корпусе (*а*) и односекционного конденсатора в цилиндрнческом корпусе (*б*): *1*—корпус; *2*—проходные изоляторы; *3*—выводы; *4*—корпусная изоляция; *5*—секции; *6*—контактный узел; *7*—внутренние предохранители; *8*—перемычки

Для подвода напряжения к обкладкам служат *контактные узлы и выводы секций*. У секций со скрытыми фольговыми обкладками вывод секцнй представляет собой узкую полоску фольги, накладываемую при намотке секции на обкладку (обычно на 2/3 ее ширины), которая образует *вкладной контактный узел*. У секции с выступающими фольговыми обкладками на торцы секций наносится слой припоя или напыляется слой металла, образующие контактные узлы, к которым припаиваются проволочные или ленточные выводы секций. Также методом напыления (одну из наиболее распространенных разновидностей метода называют шоопированием) изготавливаются контактные узлы на торцах секций с металлизированными обкладками (шоопировки).

Для исключения короткого замыкания и скользящих разрядов по поверхности диэлектрика между обкладками их ширина и положение на лентах диэлектрика выбираются с таким расчетом, чтобы образовывались *закрайны* — непокрытые обкладками полоски по краям лент диэлектрика. Ширина закрайны обычно составляет от нескольких миллиметров для низковольтных конденсаторов и до 8—15 мм для секций высоковольтных конденсаторов.

Высокая гигроскопичность конденсаторной бумаги требует герметизации бумажных и металлобумажных конденсаторов. Поэтому конденсаторы с бумажным диэлектриком конструктивно оформлены в основном в металлических корпусах со стеклянными или керамическими изоляторами. Секция (или пакет секций) изолируется от металлнческого корпуса с помощью пропитанных пресшпановых прокладок, изоляционных коробок и колпачков. У некоторых типов конденсаторов с бумажным диэлектриком (БМ, БМТ, МБМ), к которым не предъявляются требования повышенной влагостойкости, для защиты от внешней среды используется алюминиевый цилиндрический корпус, уплотненный по торцам резиновой шайбой или с помощью заливки эпоксидным компаундом. Для этих конденсаторов характерно заметное ухудшение электрических характеристик в условиях длительного воздействия повышенной влажности илн при хранении в полевых условиях.

Синтетические полимерные пленки обладают малым коэффициентом влагопоглощения, поэтому они, как правило, не требуют герметизации конструкции в вакууме. Пленочные конденсаторы для изделий спецтехники выпускаются в алюминиевых корпусах с заливкой торцов эпоксидной композицией (для обеспечения устойчивости к воздействиям механических нагрузок). Для аппаратуры широкого применения пленочные конденсаторы выпускаются в опрессовке пластмассами или обернутые в лнпкие ленты с заливкой торцов эпоксидной смолой — для цилиндрической конструкции. Полистирольные конденсаторы с фольговыми обкладками выпускаются открытой конструкции, без всякой защиты от внешней среды (конденсаторы термозапечены

до стеклообразного состояния). Плоскопрессованные конденсаторы с однонаправленным расположением выводов выпускаются окукленными в эпоксидный компаунд или в прямоугольные пластмассовые корпуса.

Конденсаторы с осевым расположением выводов предназначаются для навесного монтажа, с радиальными однонаправленными выводами — для печатного монтажа в аппаратуре.

Пакет секций, представляющий собой все секции или группу секций конденсатора, обернутых слоистым изоляционным материалом (бумагой, пленкой и т. д.) или вложенные в коробку из изоляционного материала, помещаются *в корпус конденсатора.* Корпус изготовляется из металла или диэлектрика и служит для защиты секций от механических повреждений и климатических воздействий, а также для предотвращения утечки пропитывающей жидкости. Выводы пакета секций привариваются или припаиваются к металлическим выводам конденсатора, которые изолируются от металлического корпуса с помощью стеклянных или керамических проходных изоляторов (рис. 3.2.3), либо без них с помощью крышек или крышки из изоляционного материала. Выводы конденсаторов, рассчитанных на работу при значительных токах, представляют собой шпильки диаметром от 6 до 16 мм, изготавливаемые обычно из латуни. У малогабаритных конденсаторов выводы бывают лепестковые, проволочные (диаметром 0,5—2,0 мм) или в виде шинок толщиной 0,4—0,8 мм и шириной 4—6 мм, которые непосредственно припаиваются к контактным узлам. Число выводов у некоторых типов конденсаторов (трехфазных, подстроечных электротермических и др.) больше двух, к ним присоединяются группы секций.

Особенности конструкции силовых конденсаторов

Основой подавляющего большинства силовых конденсаторов является плоскопрессованная секция. Из секции собирается пакет. В некоторых типах конденсаторов (связи, делителей напряжения, импульсных и др.) группа пакетов образует одну конструктивную единицу, называемую выемной частью. Пакет или выемная часть помещается в корпус и после термовакуумной обработки (сушка и обезгаживание), а также последующей пропитки жидким диэлектриком с целью повышения диэлектрической проницаемости и электрической прочности изоляции герметизируется в нем.

Компенсация температурного расширения жидкого диэлектрика в конденсаторах с металлическими корпусами осуществляется за счет деформации широких стенок корпуса. У конденсаторов в фарфоровых корпусах (связи, делителей напряжения, отбора мощности) для компенсации используются специальные металлические компенсаторы (расширители) мембранного типа.

Все конденсаторы, за исключением некоторых типов электротермических, предназначены для работы при естественном воздушном охлаждении. В электротермических бумажных конденсаторах кроме этого вида охлаждения применяется принудительное водяное охлаждение, осуществляемое с помощью змеевикового теплообменника, расположенного внутри конденсатора [В.6, В.9]. Вода, используемая для охлаждения, должна быть мягкой, не содержащей примесей, а также бактерий, грибков или других живых организмов. Жесткость воды — не более 7 мГ·экв/л, pH — от 5,0 до 7,5, механические примеси — не более 40 мГ/л. Остальные показатели воды должны соответствовать первому разделу ГОСТ 2874-54.

Особенности конструкции импульсных конденсаторов определяются требованиями: 1) большая удельная энергия; 2) малая внутренняя индуктивность; 3) малые потери энергии в разрядном режиме; 4) высокая динамическая устойчивость внутренних соединений секций, групп секций, выводов, контактных соединений; 5) возможность малоиндуктивного соединения с другими конденсаторами, коммутаторами и нагрузкой; 6) достаточный срок службы в режиме многократных разрядов на малые сопротивления нагрузки.

Удельная энергия импульсных конденсаторов, рассчитанных на ограниченный срок службы, значительно превосходит удельную энергию конденсаторов других типов. Это объясняется тем, что импульсное напряжение воздействует на конденсатор в течение весьма ограниченного времени, что позволяет существенно повысить допустимую рабочую напряженность E, а следовательно, удельную энергию (см. § 4.7). Большая энергия, запасаемая в импульсном конденсаторе (до 10 кДж в одном конденсаторе), малое внутреннее сопротивление (активное и внутренняя индуктивность) позволяют обеспечить большие значения разрядных токов (до 500 кА от одного конденсатора) и быструю отдачу запасенной в конденсаторе энергии в цепь нагрузки. Однако большие значения разрядных токов требуют создания в импульсных конденсаторах надежных контактных соединений (между секциями, соединительными шинами и выводами конденсатора) и высокой динамической (ударной) механической прочности токопроводов (шин и выводов конденсатора).

Импульсные конденсаторы работают при очень высоких напряженностях электрического поля (порядка 100 МВ/м и выше), что предъявляет существенные требования к электрической прочности изоляции секции. В связи с этим во многих типах импульсных конденсаторов, кроме бумажной изоляции секций, применяются пленочно-бумажная и пленочная изоляции. Основным типом полимерной пленки для импульсных конденсаторов является полиэтилентерефталат (лавсан), так как лавсановые пленки обладают высокой электрической прочностью при больших площадях электродов (до 350 МВ/м) и повышенной диэлектрической проницаемостью ($\varepsilon_r = 3{,}3$).

В некоторых типах импульсных конденсаторов, работающих при большой частоте следования импульсов или при повышенных температурах, применяются неполярные пленки, например фторопластовые. Использование фторопластовых пленок позволяет поднять рабочую температуру конденсатора до 150—200°С. Однако ограниченная ширина пленок, выпускаемых промышленностью, приводит к ограничению геометрических размеров конденсаторов, выполняемых из этой пленки. Импульсные конденсаторы на низкие напряжения (порядка сотен вольт) с пленочной изоляцией выполняются без пропитки с запеканием торцов. Наличие воздушных прослоек не позволяет в этих конденсаторах применять высокие значения рабочих напряженностей из-за возникновения частичных разрядов в прослойках.

Поэтому малогабаритные конденсаторы высокого напряжения (выше 1000 В), а также силовые импульсные конденсаторы высокого напряжения и большой энергии выполняются из бумажной, пленочно-бумажной или пленочной изоляции, пропитанной жидким диэлектриком.

В отдельных случаях для повышения рабочей температуры применяются пленочные (фторопластовые) конденсаторы, заполненные сжатым газом (азотом). Заполнение жидким диэлектриком или сжатым газом позволяет значительно увеличить напряженность частичных разрядов и использовать высокие значения рабочих напряженностей (до 100 МВ/м, в отдельных случаях до 200 МВ/м).

Силовые импульсные конденсаторы на напряжение до 50 кВ обычно выполняются в металлических корпусах с выводами, имеющими изоляторы из фарфора или пластмассы (эпоксидного компаунда). Конденсаторы на более высокое напряжение (более 60 кВ) вследствие значительных трудностей с изготовлением малоиндуктивных выводов высокого напряжения выполняются в изоляционных корпусах из полипропилена, полиэтилена, стеклоткани с эпоксидным компаундом, оргстекла, бакелизированной бумаги и др. В этих конденсаторах выводы изготовляются в виде металлических стержней, расположенных на изоляционной крышке. При этом из-за большого расстояния между выводами, определяемого требуемой электрической прочностью (необходимо обеспечить отсутствие пробоя между выводами при испытательном и рабочем напряжениях), у этих конденсаторов имеет место большая внутренняя индуктивность, определяемая главным образом индуктивностью выводов (100—200 нГн и более).

В настоящее время только в единичных конструкциях импульсных конденсаторов удалось обеспечить существенно меньшую индуктивность (15—20 нГн) при номинальных напряжениях конденсаторов 60—100 кВ. В некоторых типах импульсных конденсаторов для увеличения допустимой рабочей напряженности и надежности их работы секции конденсаторов подключаются к шинам через плавкие предохранители, отключающие секцию при ее пробое. Такая конструкция применима в основном при параллельном включении секций в конденсаторе; в данном случае номинальное напряжение конденсатора равно номинальному напряжению секции и обычно не превышает 5—10 кВ. Для этой конструкции характерны также ограниченное значение наибольшего разрядного тока, который определяется из условия отсутствия повреждения предохранителей в разрядном режиме, и несколько бо́льшая индуктивность конденсаторов. В конденсаторах на значительные разрядные токи (100 кА и более), имеющие параллельное включение секций, плавкие предохранители обычно не применяются.

В некоторых типах конденсаторов пакет состоит из плоских секций, соединенных параллельно. При такой конструкции индуктивность пакета составляет небольшую величину и индуктивность конденсатора определяется индуктивностью подсоединения секций и выводов конденсатора. Характерной особенностью этих конденсаторов является отсутствие последовательно соединенных секций, так как использование последовательного соединения в плоских пакетах неизбежно приводит к резкому увеличению индуктивности. В этом случае напряжение секций равно рабочему напряжению конденсатора, что приводит к большой толщине изоляции секции, ухудшению характеристик частичных разрядов, влечет за собой уменьшение допустимой рабочей напряженности. Это также ограничивает значение рабочего напряжения конденсатора, которое обычно не превышает 50 кВ.

В таких конденсаторах некоторое ослабление этих недостатков достигается усложнением конструкции секции: применением дополнительных промежуточных «слепых» обкладок из фольги, выравнивающих распределение потенциала. Некоторым преимуществом подобной конструкции является возможность создания хороших контактных соединений между секциями и соединительными шинами и повышенного сжатия пакетов плоских секций по сравнению с рулонными, что несколько увеличивает напряженность частичных разрядов. В целом это позволяет в ряде случаев получить достаточно хорошие характеристики конденсаторов с плоскими секциями.

§ 3.3. Конструкции конденсаторов с твердым неорганическим диэлектриком

При изготовлении конденсаторов с твердыми неорганическими диэлектриками в качестве последних применяются керамические, стеклянные, стеклоэмалевые, стеклокерамические и слюдяные диэлектрики. Эти диэлектрики используют как основу конструкции, закрепляя на них электроды. Нередко конденсатор такого типа может представлять собой кусочек диэлектрика, на который электроды нанесены непосредственной его металлизацией, и выводы в виде проволоки припаяны к этим электро-

Таблица 3.3.1

Конденсаторы	Защита от влаги	Необходимость в дополнительной защите в условиях повышенной влажности	Особенности эксплуатации	Тип конденсаторов
Незащищенные	Отсутствует	Требуется защита специальными компаундами	Допускается эксплуатация в составе герметизированной аппаратуры или блоков	Керамические
Защищенные:				
изолированные	Специальный корпус с вакуумной герметизацией или эпоксидные компаунды	Не требуется	Допускается касание корпусом конденсатора шасси или токоведущих частей аппаратуры	То же
неизолированные	Лаки и эмали	Требуется применение дополнительной влагозащиты	Не допускается касания корпусом конденсатора шасси или токоведущих частей аппаратуры	» »
Герметизированные (с вакуумноплотной изоляцией)	Имеется	Не требуется	В условиях повышенной влажности	Бумажные, металлобумажные, слюдяные, пленочные
Негерметизированные (уплотненные или опрессованные)	Имеется, но недостаточно эффективная для продолжительной работы в условиях повышенной влажности	Требуется применение дополнительной влагозащиты	Допускается непродолжительная эксплуатация в условиях повышенной влажности	То же

дам. По конструктивному исполнению конденсаторы подразделяются на незащищенные и защищенные. Последние, в свою очередь, могут быть изолированными и неизолированными (табл. 3.3.1). Защищенные конденсаторы допускают эксплуатацию в составе аппаратуры в условиях повышенной влажности, предусмотренной нормативно-технической документацией.

Конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком характеризуются большой нагревостойкостью, механической твердостью, высокой химической стабильностью, широким интервалом значений диэлектрической проницаемости. Низковольтные керамические конденсаторы ($U_н \leqslant 1600$ В) первых разработок выпускались в виде трубчатых (КТ) и дисковых (КД) конструкций и имели относительно невысокие значения номинальных емкостей. Диаметр диска составлял 6—16 мм, длина трубки 10—50 мм. Для длительной работы в условиях высокой влажности применяются герметизированные трубчатые конденсаторы, представляющие собой трубчатый конденсатор, помещенный в защитную керамическую трубку [В.19, В.20].

Наиболее широко распространены монолитные керамические конденсаторы. Они изготовляются из тонких керамических пленок с органическим пластификатором, которые подвергаются металлизации до обжига, а не после него, как обычно. Из металлизированных сырых керамических пленок, собранных стопкой, получается многопластинчатый плоский конденсатор, приобретающий после обжига вид монолитного блока. Толщина обожженного конденсатора определяется суммарной толщиной пленок, сложенных в стопку. Увеличивая число пленок в стопке и снижая их толщину, а также применяя керамическую массу с большим значением ε_r, можно получить удельную емкость до 60—70 Ф/м^3. Изготовленный таким образом монолит с припаянными выводами может быть опрессован в пластмассу или просто покрыт защитными компаундами или эмалями. Промышленностью выпускаются монолитные керамические конденсаторы с однонаправленными и разнонаправленными выводами и без выводов. В последнем случае конденсатор крепится к плате за контактные площадки пайкой или сваркой. Керамические высоковольтные конденсаторы ($U_н > 1600$ В) имеют дисковые трубчатые, горшковые и бочоночные конструкции [В.17]. Поскольку высоковольтные керамические конденсаторы используются, как правило, на высоких частотах, большое значение в их конструктивном исполнении придается контактным узлам с точки зре-

ния обеспечения малых омических потерь.

Стеклянные, стеклоэмалевые и стеклокерамические конденсаторы по конструктивному исполнению не отличаются от керамических и выпускаются промышленностью пластинчатого и монолитного типов [В.16].

Слюдяные конденсаторы, в отличие от рассмотренных выше конденсаторов с твердым неорганическим диэлектриком, изготовляются как фольговыми, так и металлизированными серебром. У фольговых пластинки слюды толщиной 0,05–0,10 мм разделены алюминиевой фольгой. Для обеспечения стабильности емкости применяется достаточно сильное сжатие конденсаторной секции в специальных обжимках или стягивающих приспособлениях, что, к сожалению, приводит к существенному увеличению объема и веса конденсаторов. В связи с этим слюдяные фольговые конденсаторы используются обычно в мощной радиоэлектронной аппаратуре.

Металлизированные слюдяные конденсаторы конструктивно мало чем отличаются от керамических. Пакет из металлизированных слюдяных пластин толщиной 0,02—0,06 мм с припаянными выводами опрессовывается пластмассой или окукливается защитным компаундом. При изготовлении герметизированного слюдяного конденсатора секцию или пакет секций помещают в металлический или керамический корпус. Выводы конденсаторов могут быть как односторонними, так и разнонаправленными.

§ 3.4. Конструкции конденсаторов с оксидным диэлектриком

Основным, наиболее распространенным типом оксидно-электролитических конденсаторов являются сухие алюминиевые конденсаторы. Их секции изготовляются намоткой из оксидированной анодной алюминиевой фольги, являющейся обкладкой и диэлектриком, и неоксидированной катодной алюминиевой фольги и волокнистой прокладки (обычно бумажной), разделяющей их. После намотки секции пропитываются пастообразным электролитом. Пропитанная электролитом секция помещается в алюминиевый цилиндрический корпус, с которым соединяется катодный вывод. Анодный вывод присоединяется к лепестку, закрепляемому на изоляционной крышке, которая, в свою очередь, удерживается в корпусе путем закатки [В.1, В.10, В.13, В.14].

Катодная фольга обеспечивает прохождение тока от пропитанной электролитом прокладки к катодному выводу конденсатора, т. е. второй обкладкой конденсатора служит электролит.

У неполярных конденсаторов анодные выводы обеих встречно включенных секций с корпусом не соединяются. Конструкции оксидных танталовых конденсаторов принципиально ничем не отличаются от описанной выше.

У оксидных объемно-пористых конденсаторов анодом служит объемно-пористое цилиндрическое тело (таблетка), опрессованное из мелкодисперсного танталового порошка с применением различных связок (камфара, раствор парафина в бензине и т. д.). Полученный таким образом анод спекается при высокой температуре в вакууме с таким расчетом, чтобы соединение зерен порошка произошло только в местах контакта между ними с сохранением максимального количества пор. Это необходимо для получения возможно большей площади поверхности анода при меньшем его объеме и соответственно большей удельной емкости конденсаторов (см. § 4.7). После формовки, т. е. получения на аноде оксидного слоя, анод приваривается к танталовой пластинке, изолированной от корпуса конденсатора и являющейся его крышкой. В ряде случаев вывод конденсатора приваривается непосредственно к аноду конденсатора.

Поскольку в объемно-пористых танталовых конденсаторах с целью снижения сопротивления электролита используются более агрессивные рабочие электролиты (35—38%-ный раствор серной кислоты и др.), корпус конденсатора обычно делается двойным: внутренний—тонкостенный из серебра и наружный—стальной для механической прочности. Если требования к конденсатору в части механической прочности не очень велики, то корпус изготовляют только с одним серебряным корпусом.

Существенным недостатком таких объемно-пористых конденсаторов является наличие в них пастообразного или жидкого электролита. Сильная зависимость сопротивления электролита от температуры окружающей среды и частоты рабочего напряжения приводит к существенному изменению емкости и тангенса угла потерь при эксплуатации конденсаторов в широком интервале температур и частот (см. § 4.1). Кроме того, определенной проблемой является обеспечение качественной герметичности таких конденсаторов, в связи с чем большая часть их отказов и сокращение ресурса связаны с утечкой электролита, особенно при повышенных рабочих температурах.

Оксидно-полупроводниковые (ОПП) конденсаторы почти лишены этих недостатков. В них, как и в других видах оксидных конденсаторов, диэлектриком служит тонкий слой окиси вентильного металла (тантала, ниобия, алюминия), образованный на его поверхности при окислении. Но рабочий электролит представляет собой электронный полупроводник—двуокись марганца, осаждаемую на оксидированный металл пиролитическим разложением азотнокислого марганца. Конструктивно оксидно-полупроводниковые конденсаторы изготавливаются в основном двух видов: цилиндрические и плоские.

В цилиндрическом ОПП конденсаторе объемно-пористый анод с нанесенным слоем двуокиси марганца покрывается слоем коллоидного графита и слоем свинцово-оловянного припоя или меди. Подготовленный таким образом анод вставляется в металлический корпус и своей нижней частью припаивается к нему. Анодный вывод че-

рез изолятор выводится наружу, катодный—припаивается к корпусу конденсатора. В плоском ОПП конденсаторе анодная таблетка прессуется в виде параллелепипеда, аналогично рассмотренному выше случаю наносится полупроводник, к контактным слоям припаиваются (привариваются) выводы. При необходимости такой конденсатор опрессовывается в пластмассу или покрывается компаундом. Промышленностью изготавливаются плоские ОПП конденсаторы и без выводов. В этом случае конденсатор припаивается к плате непосредственно контактными площадками.

Глава 4. Параметры и характеристики конденсаторов

§ 4.1. Емкость, тангенс угла потерь, мощность и энергия конденсаторов

Основными параметрами электрических конденсаторов являются: емкость, тангенс угла потерь, ток утечки и сопротивление изоляции (или постоянная времени саморазряда конденсатора). К группе важнейших параметров относятся также значения *номинальных напряжений, реактивной мощности, энергии* (для импульсных конденсаторов).

В работах [4.1, 4.2] приводятся характеристики некоторых отечественных и зарубежных приборов для измерения основных электрических параметров конденсаторов.

Электрическая емкость. В реальных конденсаторах различают статическую, динамическую и дифференциальную емкости (ГОСТ 19880-74).

Статическая емкость ($C_{ст}$) определяется на постоянном напряжении и равна отношению установившегося значения заряда q на одной из обкладок конденсатора к напряжению U между обкладками:

$$C_{ст} = \frac{q}{U}. \qquad (4.1.1)$$

Динамическая емкость ($C_{дин}$) определяется как предел отношения приращения заряда одной из обкладок конденсатора к приращению напряжения на его обкладках (ГОСТ 19880-74):

$$C_{дин} = \lim_{\Delta U \to 0} \left| \frac{\Delta q}{\Delta U} \right| = \frac{dq}{dU}. \qquad (4.1.2)$$

Дифференциальная емкость ($C_{диф}$) равна динамической ($C_{дин}$), определяемой по (4.1.2), при бесконечно медленном изменении заряда q или напряжения U (ГОСТ 19880-74). Для нелинейных конденсаторов, емкость которых зависит от приложенного к обкладкам напряжения, различают эффективную и реверсивную емкости [В.1].

Эффективная емкость ($C_{эф}$) нелинейного конденсатора равна емкости такого линейного конденсатора, заряд которого q_m при максимальном значении напряжения U_m равен заряду нелинейного конденсатора при том же напряжении:

$$C_{эф} = \frac{q_m}{U_m}. \qquad (4.1.3)$$

Значение эффективной емкости может быть определено на постоянном и переменном напряжениях и зависит от максимального значения напряжения, приложенного к обкладкам.

Реверсивная емкость (C_r) представляет собой эффективную емкость в условиях, когда кроме переменной составляющей имеется постоянная составляющая напряжения:

$$C_r = \left(\frac{q_m}{U_m} \right)_{U_0 \neq 0}. \qquad (4.1.4)$$

Реверсивная емкость зависит от переменной U_m и постоянной U_0 составляющих воздействующего напряжения. Единицей измерения емкости в системе СИ является фарада (1 Ф = 1 Кл/В = 10^6 мкФ = 10^9 нФ = 10^{12} пФ).

У конденсаторов различают номинальное и фактическое значения емкости (ГОСТ 1282-79).

Номинальная емкость ($C_н$) конденсатора указывается в его маркировке и сопроводительной документации. Значение этой емкости является исходным для определения отклонения фактической емкости конденсаторов от номинальной.

Фактическая емкость ($C_ф$)—это измеренное значение емкости конденсатора при заданных температуре и частоте.

Допускаемое отклонение (допуск по емкости) емкости конденсатора определяется как максимально допустимая разность между значениями фактической ($C_ф$), при оговоренных в нормативно-технической документации температуре и частоте, и номинальной емкостей конденсатора. Допускаемое отклонение обычно задается в процентах и вычисляется по формуле

$$\Delta C_н = \frac{C_ф - C_н}{C_н} 100\%. \qquad (4.1.5)$$

Допускаемое отклонение емкости от номинального значения (ГОСТ 9661-73, ГОСТ 1282-79) не определяет качества конденсаторов—стабильность их параметров, надежность и т. д.

Отклонение емкости обусловлено в основном случайными разбросами параметров и характеристик материалов, а также особенностями технологии изготовления конденсаторов (рис. 4.1.1, *а* и *б*).

У конденсаторов для повышения коэффициента мощности электроустановок переменного тока промышленной частоты и электротермических установок нормируется не номинальное значение емкости, а номинальная реактивная мощность (ГОСТ

1282-79). Номинальное значение емкости рассчитывается по значению номинальной мощности при номинальном напряжении и номинальной частоте при температуре +20°С (ГОСТ 1282-79).

Емкость конденсаторов зависит от температуры, частоты, значения приложенного напряжения, длительности эксплуатации.

Зависимость емкости от температуры обусловлена температурной зави-

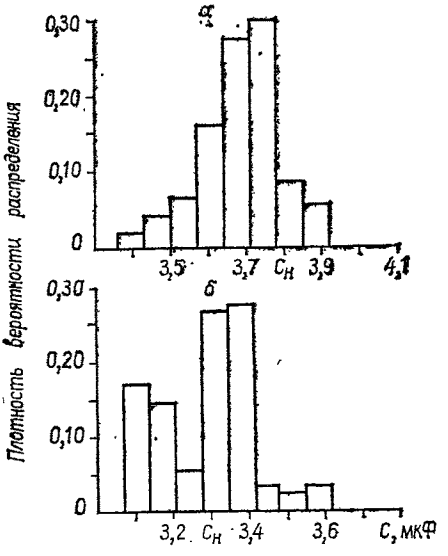


Рис. 4.1.1. Гистограммы распределения 160 штук конденсаторов ЛС-400В-3,8 мкФ (*а*) и 100 штук конденсаторов К71-4-160В-3,3 мкФ (*б*) по емкости на частоте 1000 Гц при T_0=25°С

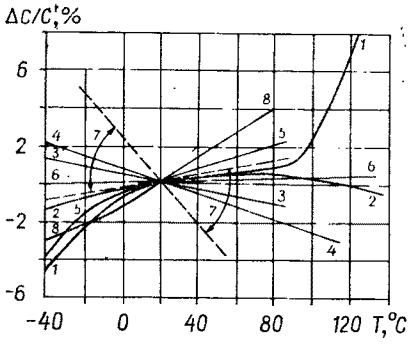


Рис. 4.1.2. Зависимость относительного изменения емкости электрических конденсаторов с полиэтилентерефталатным — лавсановым — (*1*), поликарбонатным (*2*), политетрафторэтиленовым и полистирольным (*3*), полипропиленовым (*4*), бумажным пропитанным (*5*), слюдяным (*6*), керамическим — диапазон показан стрелками (*7*), лакопленочным диэлектриками (*8*) от температуры

симостью ε_τ диэлектрика и изменением линейных размеров обкладок и диэлектрика.

Емкость конденсатора с полярным диэлектриком нелинейно зависит от температуры (рис. 4.1.2—4.1.5). Для высокочастотных керамических, слюдяных, воздушных, полистирольных и других конденсаторов эта зависимость близка к линейной (см. рис. 4.1.2).

Температурную стабильность емкости принято оценивать с помощью температурного коэффициента емкости (ТКЕ):

$$\text{ТКЕ} = \frac{1}{C}\frac{dC}{dT}. \qquad (4.1.6)$$

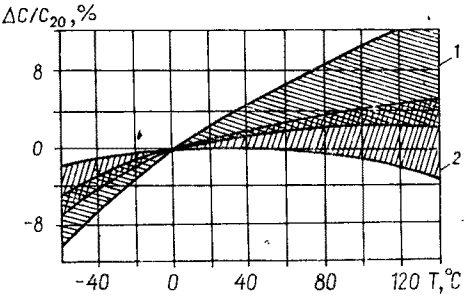


Рис. 4.1.3. Температурная зависимость емкости конденсаторов с бумажно-лавсановым (*1*) и бумажно-полипропиленовым (*2*) диэлектриками при различном объемном содержании пленки

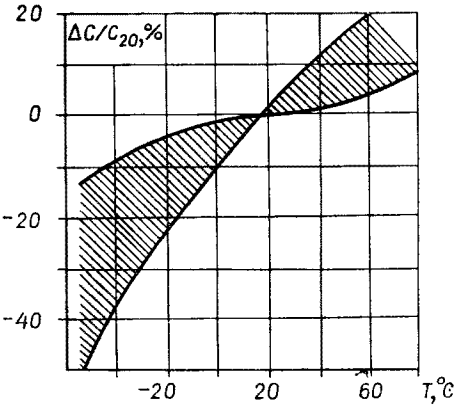


Рис. 4.1.4. Зависимость относительного изменения емкости электролитических алюминиевых конденсаторов от температуры

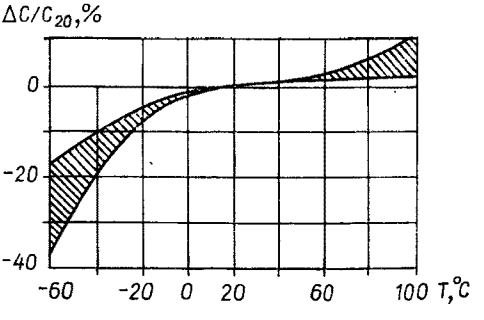


Рис. 4.1.5. Зависимость относительного изменения емкости танталовых, титановых и ниобиевых конденсаторов от температуры

ТКЕ показывает, насколько изменяется емкость при отклонении температуры на 1 К. Для конденсаторов с линейной зависимостью емкости от температуры ТКЕ определяется по формуле

$$\text{ТКЕ} = \frac{C_2 - C_1}{C_1 (T_2 - T_1)}, \qquad (4.1.7)$$

где C_1 — емкость при температуре T_1 (обычно 25±10°С); C_2 — емкость при температуре T_2 (обычно предельной—верхней или нижней); ТКЕ выражается в миллионных долях изменения емкости, отнесенный к 1 К.

Температурный коэффициент емкости может быть положительным ($C_2 > C_1$), отрицательным ($C_2 < C_1$) или близким к нулю ($C_2 \approx C_1$). Ожидаемое изменение емкости ΔC при изменении температуры от T_1 до T_2 равно $\Delta C = \text{ТКЕ}(T_2 - T_1)100\%$. Температурный коэффициент емкости конденсаторов определяется по ГОСТ 21315.5-75. Разность температур при нахождении ТКЕ в интервале положительных температур должна составлять не менее 30°С для конденсаторов с верхним пределом рабочего интервала температур до 60°С и не менее 40°С—для остальных типов конденсаторов ($T_o > +60$°С).

Частота, на которой определяется ТКЕ, оговаривается в нормативно-технической документации. Для конденсаторов с линейной или близкой к линейной зависимостью емкости от температуры нормируется значение ТКЕ.

Для конденсаторов с нелинейной зависимостью емкости от температуры (сегнетокерамических, с оксидным и полярным диэлектриками) в нормативно-технической документации приводится предельно допустимое изменение емкости конденсаторов в интервале рабочих температур относительно измеренной емкости при $T_o = 20$°С.

Нормированное значение ТКЕ указывается в маркировке конденсатора с помощью букв и цифр или цветного кода (см. § 1.4). Нормированное значение ТКЕ определяет группу стабильности емкости конденсаторов по температуре и является отличительным признаком соответствующей группы. По допускаемому отклонению ТКЕ от нормированного значения керамические, стеклокерамические и стеклянные конденсаторы подразделяют на два класса: А и Б [В.11].

Для незащищенных и неизолированных конденсаторов емкостью свыше 63 пФ и изолированных емкостью свыше 150 пФ

Таблица 4.1.1

Особенность конструкции конденсатора	Тип конденсатора	Нормированное значение ТКЕ, $10^{-6} \cdot К^{-1}$	Интервал температур нормированного ТКЕ, °С
Слюдяные*	К31 СГО КСО КСОТ СГМ и т. д.	±50÷±200	Во всем рабочем интервале
Полистирольные фольговые	К70	—200	От +20 до +60
Полистирольные металлизированные	МПО	—150	От +20 до +60
	МПГТ	—200	
	К71-3	—150	От —60 до +100
	К71-4	—150	От —60 до +85
	К71-5		
	К71-7	—(60±80)	От —60 до +85
Фторопластовые	К72-1 К72-4 К72-8 ФД	±300	От —60 до +60
	К72-9	—360	От —60 до +155
	ФТ К72П-6	+50÷(—200)	От —60 до +200
	ФЧ	—550	От —60 до +155
Поликарбонатные	К77	+(60±80)	От 20 до 100
Полипропиленовые	К78	—(250÷400)	От 20 до 100
Вакуумные	К61		
	КП	±(30±10)	От —60 до +125
	КП1-8	±(10÷100)	От —60 до +125
Воздушные	КТ2	+300	От —60 до +125
	КТ2-23	(—30)÷(+150)	От —60 до +85
	КПВ	+50	От —60 до +100
	КПВМ	+100	От —60 до +125

* Группа по ТКЕ для слюдяных конденсаторов обозначается буквами: А — фольговые с ненормируемым значением; Б, В, Г — с металлизированнымн серебром обкладками и соответствующими значениями ТКЕ: ±200; ±100; $\pm 50 \cdot 10^{-6}$ $К^{-1}$.

Таблица 4.1.2

Особенность конструкции конденсатора	Тип конденсатора	Интервал рабочих температур, °С	Допускаемые изменения емкости при крайних значениях рабочих температур, %	
			T_{0min}	T_{0max}
Бумажные с фольговыми обкладками	ОБПТ, БГТ, БМТ	—60÷(+100)	±10	±10
	К40П-2	—60÷(+85)	—10	±10
	КБП	—60÷(+70)	±15	±8
	К40У-9	—60÷(+125)	—15	+10
	К41-8	+5÷(+45)	±10	—
Металлобумажные	МБМ	—60÷(+70)	—15	±15
	МБГВ	—60÷(+60)	—10	±5
	МБГИ	—60÷(+70)	+5÷—10	±10
	МБГО	—60÷(+60)	—15	±5
	МБГТ	—60÷(+100)	—15	+5÷—12
	МБГЧ	—60÷(+70)	±10	±5
	К42У-2	—60÷(+70)	+3÷—15	±10
	К42Ч-6	0÷(+35)	±3	—
С комбинированным диэлектриком	ПГКТ, К75-12, К75-15	—60÷(+100)	—10	+10
	К75-10	—60÷(+100)	—10	+8
	К75-11, 14, 17, 18, 19, 20	—60÷(+60)	—10	+5
	К75-21	—60÷(+85)	—10	+10
	К75-22	—60÷(+125)	—10	±12
	К75-24	—60÷(+125)	—12	+15
	К75-25	—60÷(+100)	—5	+5
	К75-40	—60÷(+70)	—10	+10
Пленочные:				
полистирольные	ПМ	—60÷(+70)	±2	±2
фторопластовые	ФГТИ	—60÷(+155)	+5	—5
	К72П-3	—60÷(+200)	+10	—10
	К72-11	—60÷(+70)	+7	—5
поликарбонатные металлизированные	К77	—60÷(+125)	—2,5	+2
полиэтилентерефталатные металлизированные	К73	—60÷(+125)	—(8÷12)	+20
полиэтилентерефталатные фольговые	К73	—60÷(+100)	—10	+10
Лакопленочные металлизированные	К76	—60÷(+70)	—10	+6
Оксидные:				
алюминиевые электролитические	К50	—20÷+(60÷85)	—(20÷50)	+(20÷40)
танталовые электролитические	К51	—60÷(+100)	—(20÷50)	+(20÷40)
объемно-пористые электролитические	К52	—60÷(+200)	—(15÷75)	+(10÷40)
оксидно-полупроводниковые	К53	—60÷(+85)	—(15÷40)	+(15÷50)

допускаемое отклонение ТКЕ у класса А в 2,0—2,5 раза меньше, чем у класса Б.

В табл. 1.4.4 (см. § 1.4) приведены нормированные значения и допускаемые отклонения ТКЕ для керамических, стеклокерамических и стеклянных конденсаторов, в табл. 4.1.1 — ТКЕ для некоторых видов конденсаторов с твердым и газообразным диэлектриками. Условные обозначения группы ТКЕ цветным кодом, а также при помощи букв и цифр даны в табл. 1.4.4 (см. § 1.4), допускаемые изменения емкости некоторых типов конденсаторов с нелинейной зависимостью емкости от температуры—в табл. 4.1.2 и 1.4.5 (см. § 1.4.).

При конструировании и изготовлении электронной аппаратуры часто применяются параллельное и последовательное соединения конденсаторов [В.1]. При параллельном соединении общая емкость группы равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$$C=C_1+C_2+C_3+\ldots+C_m, \qquad (4.1.8)$$

при последовательном —

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}+\ldots+\frac{1}{C_n}. \qquad (4.1.9)$$

Если группа собрана из конденсаторов с одинаковым значением емкостей $C_н$, то при параллельном соединении m конденсаторов

$$C=mC_н, \qquad (4.1.10)$$

а при последовательном соединении n конденсаторов

$$C = \frac{C_н}{n}. \qquad (4.1.11)$$

При сложном последовательно-параллельном соединении конденсаторов общая емкость C находится в помощью формул (4.1.8)—(4.1.11), применяемых к отдельным участкам цепи.

Если батарея собрана из m параллельно соединенных групп конденсаторов, которые состоят из n последовательно соединенных конденсаторов, то суммарная емкость

$$C = \frac{m}{n} C_н. \qquad (4.1.12)$$

Если обозначить ТКЕ батареи через α_c, то при параллельном соединении m конденсаторов справедливо выражение

$$\alpha_c = \frac{C_1}{C}\alpha_{c1} + \frac{C_2}{C}\alpha_{c2} + \ldots$$

$$\ldots + \frac{C_m}{C}\alpha_{cm}, \qquad (4.1.13)$$

а при последовательном соединении n конденсаторов —

$$\alpha_c = \frac{C}{C_1}\alpha_{c1} + \frac{C}{C_2}\alpha_{c2} + \ldots$$

$$\ldots + \frac{C}{C_n}\alpha_{cn}. \qquad (4.1.14)$$

Имея конденсаторы с различными значениями ТКЕ и используя параллельное, последовательное и смешанное соединения, можно получить для батареи конденсаторов требуемое значение ТКЕ, в том числе близкое к нулю [В.1, 4.3, 4.4]. Значения емкостей двух параллельно соединенных конденсаторов, при которых результирующее значение ТКЕ системы будет близко к нулю, определяются из выражений

$$C_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} C; \quad C_2 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} C. \qquad (4.1.15)$$

Такой подбор емкостей часто используется при создании измерительных конденсаторов.

Зависимость емкости от частоты обусловлена в основном индуктивностью и активными сопротивлениями конденсатора (§ 4.3). Емкость может меняться также в связи с изменением относительной диэлектрической проницаемости ε_r диэлектрика конденсатора с частотой (см. § 2.1).

Завнсимость емкости от частоты можно определить экспериментально или расчетным путем по параметрам схемы замещения конденсатора (§ 4.3).

Емкость конденсатора измеряется по параллельной или последовательной схеме замещения [4.5, 4.6]. Различают зависимость емкости от частоты для последовательной и параллельной схем замещения.

На частоте первого собственного резонанса f_0 эквивалентная емкость конденсатора по параллельной схеме замещения $C_{рэ}$ равняется нулю, а эквивалентная емкость по последовательной схеме замещения $C_{ээ}$ — бесконечности (§ 4.3, рис. 4.3.14).

Значение эквивалентной емкости конденсатора $C_{ээ}$ при последовательной схеме замещения зависит от индуктивности $L_э$ и относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика ε_r, но не зависит от эквивалентного последовательного активного сопротивления конденсатора $r_{ээ}$.

С повышением частоты ε_r уменьшается, что приводит к снижению $C_{эд}$, а следовательно, и $C_{ээ}$.

Эквивалентная индуктивность конденсатора $L_э$ способствует увеличению его экви-

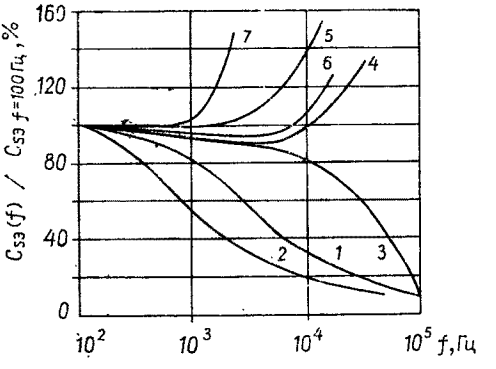


Рис. 4.1.6. Зависимость относительного значения емкости $C^*_{ээ}$ конденсаторов с оксидным диэлектриком по последовательной схеме замещения от частоты при T_0=20°С: К52-2-25В-200,0 мкФ (*1*), К52-3-6В-1000,0 мкФ (*2*), К50-7-160/185В-200,0 мкФ (*3*), К-50-12-350В-(150+30) мкФ (*4*), К50-20-160В-100 мкФ (*5*), К50-ЗИ-450В-500,0 мкФ (*6*), К50-3Б-25В-2000,0 мкФ (*7*)

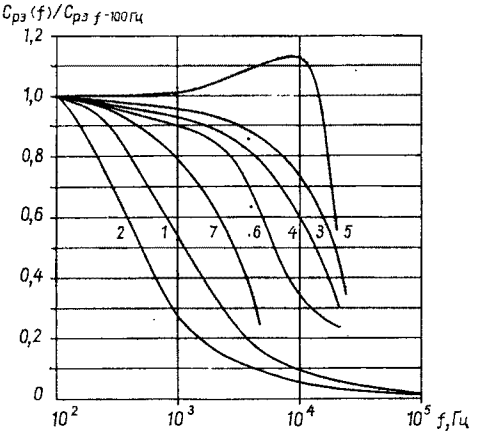


Рис. 4.1.7. Относительное измененне эквивалентной емкости по параллельной схеме замещения $C_{рэ}$ для конденсаторов К-52-2-25В-200,0 мкФ (*1*), К52-3-6В-1000 мкФ (*2*), К50-7-160/185В-200 мкФ (*3*), К50-12-350В-(150+30) мкФ (*4*), К50-20-160В-100 мкФ (*5*), К50-ЗИ-450В-500 мкФ (*6*), К50-3Б-25В-2000 мкФ (*7*) от частоты при T_0=20°С

валентной емкости $C_{ээ}$. Ее значение можно определить по формуле

$$C_{ээ} = \frac{C_{эд}(\omega)}{1-(f/f_0)^2}, \qquad (4.1.16)$$

где $C_{эд}(\omega)$ — емкость диэлектрической системы конденсатора по последовательной схеме замещения (рис. 4.3.4, *а*).

При частотах $f < (0{,}05—0{,}10)\, f_0$ характер зависимости емкости конденсатора $C_{ээ}$ по последовательной схеме замещения определяется в основном частотной зависнмостью ε_r диэлектрика конденсатора, а при $f > (0{,}05—0{,}10) f_0$—индуктивностью конденсатора. Различный характер зависимости емкости $C_{ээ}$ конденсаторов с оксидным диэлектриком от частоты (рис. 4.1.6) обусловлен особенностью физических явлений [В.10], протекающих в такнх конденсаторах и имеющих более сложную схему замещения (см. рис. 4.3.8, § 4.3).

Зависимость емкости от частоты по параллельной схеме замещения обусловлена относительной диэлектрической проницаемостью ε_r, индуктивностью $L_э$, $\mathrm{tg}\delta = \omega C_{ээ} r_{ээ}$.

Эквивалентная индуктивность $L_э$ увеличивает, а $\mathrm{tg}\delta$ и ε_r снижают эквивалентную емкость конденсатора $C_{рэ}$ при повышении частоты (рис. 4.1.7). Емкость $C_{рэ}$ по параллельной схеме замещения (рис. 4.3.6, *б*) связана с параметрами последовательной схемы замещения конденсатора (рис. 4.3.6, *а*) соотношением

$$C_{рэ} = \frac{C_{ээ}}{1+\omega^2 C_{ээ}^2 r_{ээ}^2} = \frac{C_{эд}\left[1-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]}{\left[1-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2 + \omega^2 C_{эд}^2 r_{ээ}^2}, \qquad (4.1.17)$$

где $C_{ээ}$ и $r_{ээ}$ — эквивалентная емкость и активное сопротивление конденсатора по последовательной схеме замещения на частоте ω.

Отличия между $C_{ээ}$ и $C_{рэ}$ тем больше, чем больше $\mathrm{tg}\delta$ конденсатора на данной частоте. При частотах, на которых $\mathrm{tg}\delta < 0{,}1$, значения емкости $C_{ээ}$ и $C_{рэ}$ практически не отличаются, т. е. $C_{ээ} \approx C_{рэ}$.

Сопротивление $r_{ээ}$ зависит от частоты (см. § 4.3). На рис. 4.1.8 и 4.1.9 изображены зависимости $r_{ээ}$ некоторых конденсаторов от частоты.

Зависимость емкости от напряжения для большинства типов диэлек-

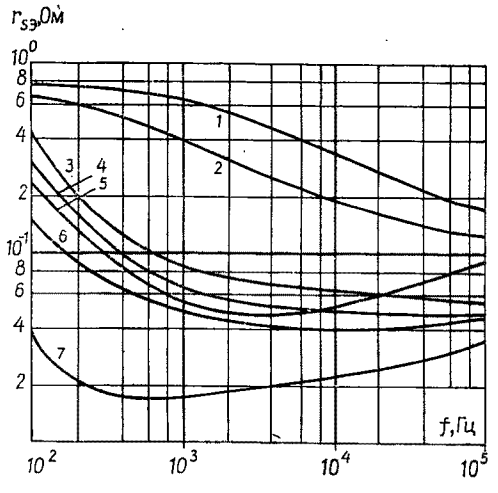


Рис. 4.1.8. Зависимость $r_{ээ}$ конденсаторов К52-2-50В-200,0 мкФ (*1*), К52-3-6В-1000 мкФ (*2*), К50-7-160/185В-200 мкФ (*3*), К50-12-350В-(150+30) мкФ (*4*), К50-20-160В-100 мкФ (*5*), К50-3И-450-500 мкФ (*6*), К50-3Б-25В-2000 мкФ (*7*) от частоты при T_0=20°С

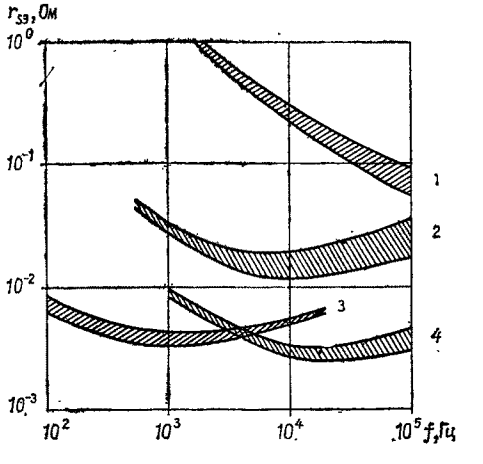


Рис. 4.1.9. Зависимость эквивалентного последовательного активного сопротивления $r_{ээ}$ конденсаторов К76П-1-63В-1,0 мкФ (*1*), К75-31-300В-10,0 мкФ (*2*), ПСК-1,25-200 мкФ (*3*), К71-4-160В-3,3 мкФ (*4*) от частоты при T_0=20°С

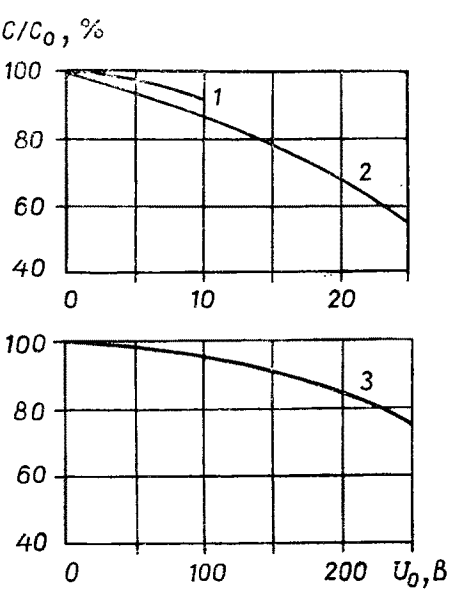


Рис. 4.1.10. Зависнмость емкостн конденсаторов К10У-5 (3-го типа) от постоянного напряження $U_н$, В: *1*—10; *2*—25; *3*—100

Таблица 4.1.3

Тип конденсатора	Среднее изменение емкости при длительном хранении, %		Предельно допустимое изменение емкости к концу срока службы или хранения (сверх установленных допускаемых отклонений)
	около одного года	около пяти лет	
Воздушный и слюдяной образцовые	±(0,01÷0,02)	—	±0,5
Слюдяной опрессованный хорошего качества	±(0,05÷0,10)	±0,3	±3
Керамический высокочастотный, стеклоэмалевый (1-го типа)	±(0,01÷0,05)	—0,5	±(2÷5)
Керамический (2-го типа)	—(1÷5)	—(3÷8)	±10
Керамический низкочастотный	—(10÷20)	—	±(20÷40)
Полистирольный герметизированный	±(0,1÷0,2)	—0,6	±(2÷5)
Поликарбонатный герметизированный	±0,1	±0,5	±5
Бумажный герметизированный	±(1÷2) (чаще минус)	—(2÷4)	±10
Бумажный негерметизированный	+2	+(8÷10)	±35
С оксидным диэлектриком на вентильных металлах	—(2÷10)	—	—50
Оксидно-полупроводниковые	—	—3	±(20÷30)

триков, применяемых в конденсаторах, выражена слабо и ею можно пренебречь. Исключение составляют конденсаторы, где в качестве диэлектрика используются сегнетоэлектрики. У последних ε_τ зависит от напряженности поля (вариконды и варикапы), а также часть керамических конденсаторов типа К10 (рис. 4.1.10).

Стабильность емкости во времени характеризуется изменением емкости конденсатора за определенный промежуток времени.

Различают обратимые и необратимые изменения емкости.

Обратимые изменения емкости обусловлены в основном увлажнением диэлектрика конденсатора. После удаления влаги емкость конденсатора восстанавливает свое первоначальное значение. К обратимым можно отнести изменения емкости, которые наблюдаются у конденсаторов с вкладными контактами в процессе хранения или работы при напряжениях ниже 10 В. Эти изменения происходят из-за окисления поверхности вкладного контакта и увеличения переходного сопротивления.

При повышении напряжения оксидная пленка пробивается и первоначальное значение емкости конденсатора восстанавливается.

Необратимые изменения емкости являются следствием необратимых изменений электрических параметров диэлектрической системы (ε_r, tgδ) и размеров. Изменения размеров вызваны колебаниями температуры и зависят от размаха, частоты и скорости изменения температуры. Имеется определенная корреляция между величиной необратимых изменений размеров конденсатора и коэффициентами линейного расширения материалов, в первую очередь—рабочего диэлектрика, из которого изготовлен конденсатор. Чем больше коэффициент линейного расширения, тем значительнее остаточные изменения размеров, а следовательно, и емкости [В.1].

Стабильность емкости зависит от особенностей конструкции конденсаторов. Например, снижение емкости металлизированных конденсаторов зависит от количества актов самовосстановления в них (см. § 2.5) за время эксплуатации. Стабильность емкости негерметизированных конденсаторов ниже, чем герметизированных. Керамические и слюдяные конденсаторы с серебряными обкладками характеризуются кратковременными самопроизвольными скачкообразными изменениями емкости (мерцание емкости) [В.1].

Явление мерцания емкости (см. § 2.6) приводит к ухудшению стабильности емкости конденсаторов во времени. Некоторое представление об изменении емкости во времени для отдельных типов конденсаторов дают значения, приведенные в табл. 4.1.3 [В.1].

Тангенс угла потерь характеризует потери в конденсаторе (§ 2.1, 2.2) и определяется как отношение активной мощности конденсатора к его реактивной мощности при синусоидальном напряжении определенной частоты (ГОСТ 21415-75)

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{P}{Q}. \qquad (4.1.18)$$

Тангенс угла потерь может быть выражен через параметры последовательной или параллельной схемы замещения (см. § 4.3):

$$\operatorname{tg}\delta = \omega C_{s\text{э}} r_{s\text{э}} = \frac{1}{\omega C_{p\text{э}} R_{p\text{э}}}. \qquad (4.1.19)$$

В отличие от емкости значение тангенса угла потерь конденсатора не зависит от схемы замещения, для которой он измеря-

Таблица 4.1.4

Тип конденсатора	Максимальная температура окружающей среды, $T_{o\ max}$, °С	Частота измерения, Гц	Значения tgδ	
			20°С	$T_{o\ max}$, °С
Керамический высокочастотный К10, К15 (1-го типа)	85—155	10^6	0,0010—0,0015	0,0015—0,0025
Стеклянный (К21)	200	10^6	0,002	—
Стеклокерамический (К22), кроме группы Н	155	10^6	0,002	—
Стеклоэмалевый (К23)	100	10^6	0,001	0,0018
Слюдяной (К31)	155	10^6	0,001—0,002	0,002—0,004
Полистирольный (К71):				
К71-3	100	10^3	0,0015	0,0020
К71-4, К71-5	85	10^3	0,0015	0,0020
К71-7	85	10^3	0,0010	0,0015
Фторопластовый:				
К72-1, К72-4, К72-8, ФД	155	10^3	0,0010	0,0015
ФТ, К72П-6	200	10^3	0,0010	0,0015
К72-11	70	10^3	0,0005—0,0008	0,0007—0,0008
Поликарбонатный (К77)	70—125	10^3	0,0025	0,0025
Полипропиленовый (К78)	70—100	50—10^3	0,001—0,002	0,001—0,002
Керамический низкочастотный (К10, К15):				
(группа Н) 2-го типа	85	10^3	0,015—0,035	0,02—0,07
(группа Н) 3-го типа	85	10^3	0,10	—
Стеклокерамические (группа Н) К22	100	10^3	0,010	—
Металлобумажный:				
К42У-2	85	50	0,008	—
МБГЧ	100	50	0,010	0,020
МБГ	70	50—10^3	0,015	—
Металлопленочный:				
К73-6	50	10^3	0,015	0,015
К73П-2, К73-11	125	10^3	0,015	0,045
	125	50	0,010	0,030
К73-15	100	10^3	0,010	0,015
Лакопленочный:				
К76П-1	70	10^3	0,010	0,020
К76-2	85	10^3	0,010	0,020
Комбинированный:				
К75-10	100	50	0,008	0,020
К75-12	100	10^3	0,010	0,020
К75-11, К75-20	40	50	0,008	0,010
К75-14, К75-18	50	50	0,008	0,020
К75-17, К75-19	60	50	0,008	0,020
К75-22, К75-24	125	10^3	0,010	0,015
Электролитический алюминиевый ЭМ на 150 В	60	50	0,10	—
Алюминиевый танталовый объемно-пористый:				
К52-1А	85	50	0,15	—
К52-2А	200	50	0,30	—
Оксидно-полупроводниковый:				
К53-1А, К53-6А	125	50	0,08	—
К53-7	85	50	0,06	—

Продолжение табл. 4.1.4

Тип конденсатора	Максимальная температура окружающей среды, $T_{o\ max}$, °С	Частота измерения, Гц	Значения tgδ	
			20°С	$T_{o\ max}$, °С
К53-А	85	50	0,20	—
Электролитический алюминиевый: К50-7	85	50	0,15—0,25	—
К50-12	70	50	0,10—0,35	—
К50-15	85	50	0,10—0,25	—
К50-6	70	50	0,15—0,45	—

ется или рассчитывается. Тангенс угла потерь является безразмерной величиной, но его значение можно выразить в процентах ($tg\delta = tg\delta \cdot 100\%$).

В нормативно-технической документации задаются предельно допустимые значения tgδ при определенной частоте и температуре. Эти значения tgδ используются для контроля технологии производства конденсаторов.

В табл. 4.1.4 приведены предельно допустимые значения tgδ некоторых типов конденсаторов соответственно с малыми и большими потерями [В.11]. Измеренные значения tgδ при температурах и частотах, на которых задаются предельно допустимые значения tgδ, ниже, чем в табл. 4.1.4, и имеют определенный разброс (рис. 4.1.11 и 4.1.12, *а* и *б*).

Тангенс угла потерь конденсаторов можно разделить на две составляющие:

$$tg\delta = tg\delta_д + tg\delta_м, \qquad (4.1.20)$$

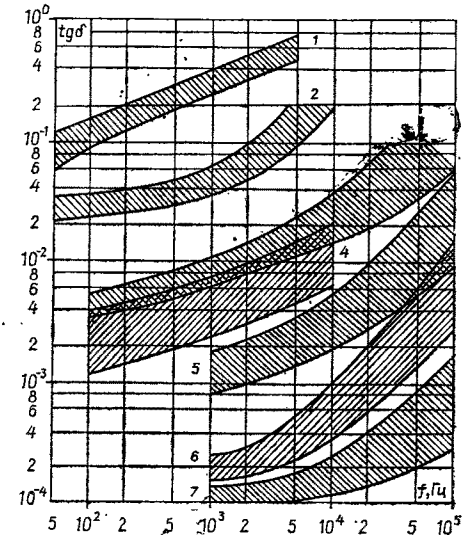


Рис. 4.1.11. Зависимость tgδ алюминиевых электролитических (*1*), танталовых и ниобисвых (*2*), металлобумажных МБГЧ (*3*), с комбиинированным диэлектриком К75 (*4*), поликарбоиатных К77-5 (*5*), полистирольных металлизированиых К71-4 $C_н \geqslant 1{,}0$ мкФ (*6*), политетрафторэтиленовых с фольговыми обкладками К72-11А (*7*) конденсаторов от частоты при $T_0 = 20$°С

где $tg\delta_д$ характеризует потери энергии в рабочем и вспомогательном диэлектрике; $tg\delta_м$ — потери в токоведущих и нетоковедущих металлических частях конструкции.

Тангенс угла потерь, обусловленный потерями в металлических частях конструкции конденсатора, рассчитывается по формуле

$$tg\delta_м = 2\pi f C_{ээ} r_м(f), \qquad (4.1.21)$$

где $C_{ээ}$ и $r_м(f)$ — эквивалентная емкость и сопротивление металлических частей конденсаторов по последовательной схеме замещения при частоте f (§ 4.3).

Характер зависимости от частоты составляющей $tg\delta_м$ обусловлен конструктив-

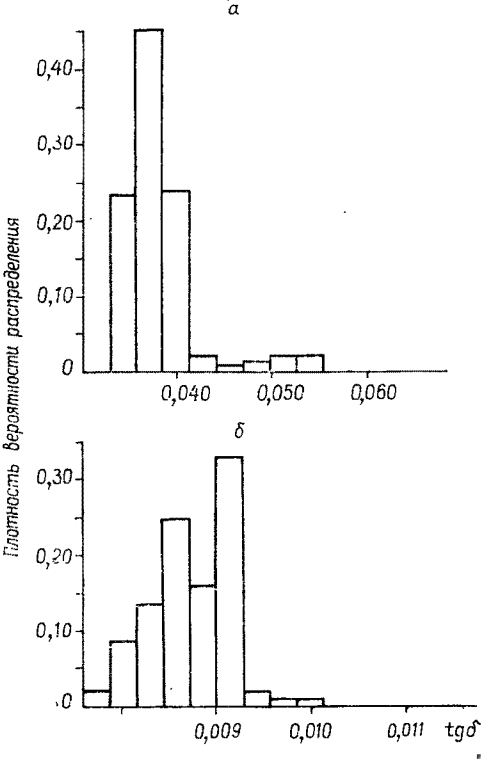


Рис. 4.1.12. Гистограммы распределения значений tgδ выборки конденсаторов ($N = 160$ шт.) типа ЛС-400В-3,8 мкФ на частотах 100 (*а*) и 1000 Гц (*б*) при $T_0 = 20$°С

ными особенностями конденсаторов и номинальной емкостью (см. рис. 4.3.10, § 4.3). На рис. 4.1.13 приведены качественные зависимости $tg\delta_м$ от частоты конденсаторов различного конструктивного исполнения.

Характер зависимости составляющей $tg\delta_д$ определяется типом диэлектрика конденсатора. У конденсаторов с органическим полярным диэлектриком $tg\delta_д$ растет с частотой, а для конденсаторов с неполярным диэлектриком $tg\delta_д \approx const$. Слабая зависимость $tg\delta_д$ от частоты характерна для слабополярных диэлектриков (рис. 4.1.14). Для керамических высокочастотных и стеклянных конденсаторов $tg\delta_д$ уменьшается с повышением частоты (см. рис. 4.1.14). Для конденсаторов с неполярным диэлектриком зависимость $tg\delta$ от частоты можно получить расчетным путем. На рис. 4.1.15 приведена расчетная зависимость $tg\delta$ конденсатора К71-4-250-1,0 мкФ (*5*) и К71-4-160В-10 мкФ (*4*). Здесь же показаны зависимости $tg\delta$ конденсаторов К72-11-500В-1,0 мкФ с металлическим (*6*), пластмассовым (*7*) корпусами и металлобумажных типа МБГЧ с металлическим корпусом (*1* и *2*) и без него (*3*).

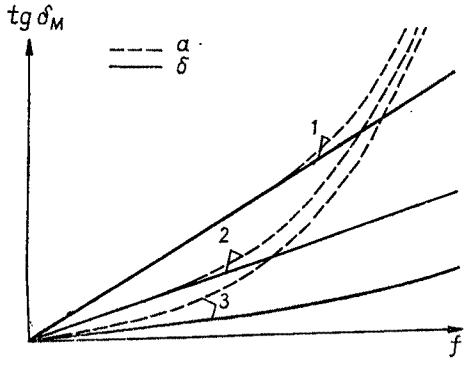


Рис. 4.1.13. Качественные зависимости $tg\delta_м$ от частоты конденсаторов с металлизированными (*1*), фольговыми скрытыми (*2*) и выступающими (*3*), обкладками. Корпус стальной (*а*) и немагнитный (*б*)

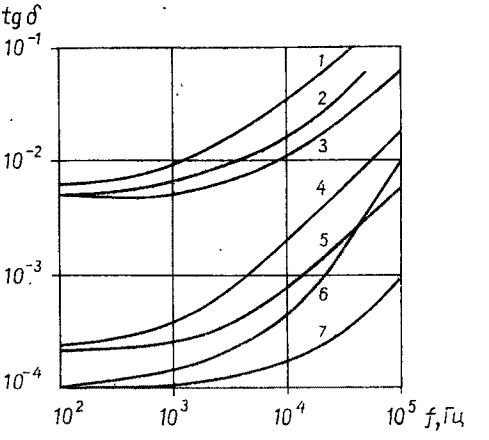


Рис. 4.1.15. Зависимость $tg\delta$ от частоты конденсаторов МБГЧ-250В-10 мкФ (*1*), МБГЧ-1000В-1,0 мкФ (*2*) в стальном корпусе и пакета секций МБГЧ-1000В-1,0 мкФ (*3*), К71-4-160В-10 мкФ (*4*), К71-4-250В-1,0 мкФ (*5*), К72-11-500В-1,0 мкФ в стальном (*6*) и пластмассовом (*7*) корпусах при T_0=25°С

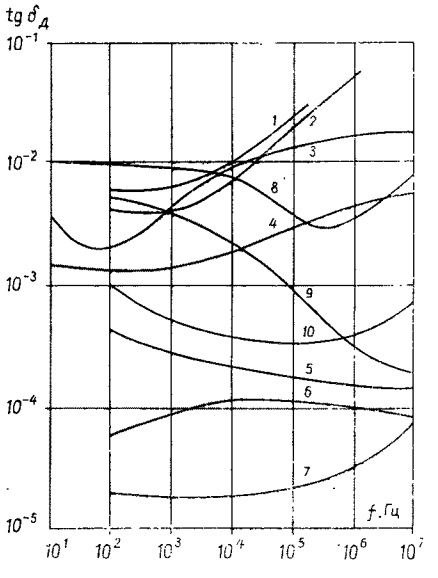


Рис. 4.1.14. Зависимость от частоты $tg\delta_д$ бумаги, пропитанной касторовым маслом (*1*) и трихлордифенилом (*2*) [В.4], полиэтилентерефталата (*3*), поликарбоната (*4*), полистирола (*5*) [В.2], тщательно очищенных полипропилена (*6*) и политетрафторэтилена (*7*), [В.44], стеклокерамики СТ-7500 (*8*), СТ-80 (*9*) и керамики Т-150 (*10*) [В.17]

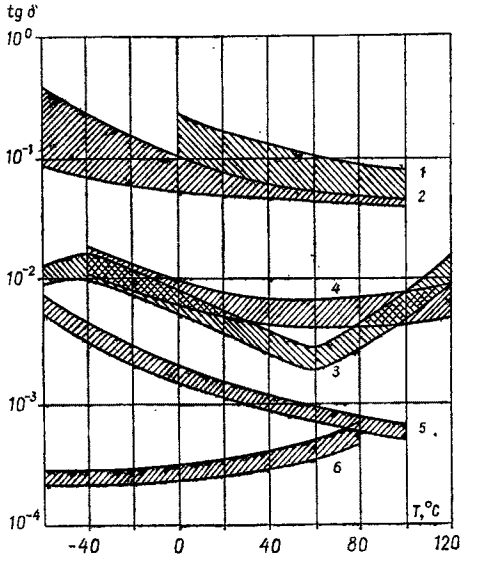


Рис. 4.1.16. Зависимость от температуры $tg\delta$ алюминиевых электролитических (*1*), танталовых и ниобиевых (*2*), полиэтилентерефталатных (*3*), комбинированных (ПЭТФ + бумага) (*4*), поликарбонатных (*5*) и полистирольных (*6*) конденсаторов на частотах 50 (*1*, *2*) и 1000 Гц (3—6)

Таблица 4.1.5

Типы конденсаторов	Среднее изменение тангенса угла потерь при длительном хранении (пять лет и более), %
Керамические высокочастотные (1-го типа)	+(8—10)
Керамические низкочастотные (2-го и 3-го типов)	±(15—20)
Слюдяные опрессованные	+5
Полистирольные герметизированные	+(10—15)
Бумажные герметизированные	+(40—60)

Тангенс угла потерь конденсаторов зависит от температуры (рис. 4.1.16 и 4.1.17). В области низких частот характер температурной зависимости tgδ конденсатора определяется зависимостью $tg\delta_д$ диэлектрика.

На высоких частотах, когда преобладают потери в металлических частях, зависимость tgδ от температуры определяется зависимостью удельного сопротивления этих частей от температуры.

Для некоторых видов конденсаторов наблюдается также зависимость tgδ от напряжения, обусловленная ЧР (область повышенных значений напряжений) и потерями, связанными с миграционной поляризацией [В.1, В.12].

Сильная зависимость tgδ от приложенного напряжения характерна для конденсаторов с сегнетокерамическим диэлектриком из-за потерь при доменной поляризации.

Зависимость tgδ от времени обусловлена изменениями структуры диэлектрика, обкладок, увлажнением диэлектрика и окислительными процессами в контактных узлах. Эти изменения, как правило, имеют необратимый характер. При удалении влаги из конденсатора tgδ уменьшается. При эксплуатации большее изменение tgδ характерно для негерметизированных, неизолированных и незащищенных конденсаторов.

В табл. 4.1.5 приведены средние значения изменения tgδ для некоторых типов конденсаторов при длительном хранении. На практике часто используются последовательное и параллельное соединения конденсаторов с потерями. В этом случае тангенс угла потерь для последовательного, параллельного и последовательно-параллельного соединений конденсаторов может определяться по формулам [4.5], приведенным в табл. 4.1.6.

Иногда вместо tgδ для характеристики потерь в конденсаторе используется величина, равная произведению емкости на тангенс угла потерь конденсатора. Это произведение $C \cdot tg\delta$ получило название *фактора потерь* конденсатора.

Полное сопротивление Z является важным параметром фильтровых, проходных, помехоподавляющих конденсаторов и вычисляется по формуле

$$Z = \sqrt{r_{sэ}^2 + (X_c - X_L)^2}, \quad (4.1.22)$$

где $r_{sэ}$ — эквивалентное последовательное активное сопротивление конденсатора; $X_c = \frac{1}{\omega C_{sд}}$ и $X_L = \omega L_э$ — реактивные емкостное и индуктивное сопротивления соответственно; $L_э$ — эквивалентная индуктивность конденсатора (см. § 4.3).

При частотах выше резонансной $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_э C_{sд}}}$ реактивное сопротивление конденсатора имеет индуктивный характер,

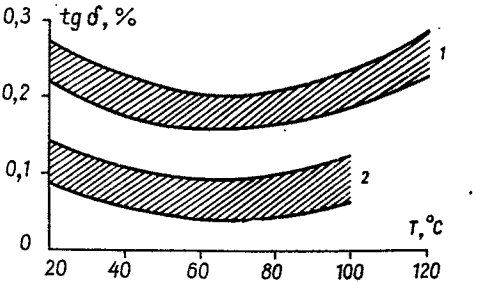


Рис. 4.1.17. Зависимость tgδ от температуры силовых косинусных конденсаторов, пропитанных трихлордифенилом с бумажным (*1*) и комбинированным (бумага + полипропилен) (*2*) диэлектриком на частоте 50 Гц

т. е. при $f > f_0$ ток отстает по фазе от приложенного напряжения. Поэтому конденсаторы должны применяться на частотах ниже резонансных.

Эквивалентная индуктивность ($L_э$) является важным параметром для конденсаторов, работающих в импульсном режиме и высокочастотных установках. От ее значения зависит верхний предел рабочей частоты конденсатора, а также параметры (амплитуда и форма) разрядного тока импульсных конденсаторов.

При последовательном соединении конденсаторов суммарная индуктивность равна сумме индуктивностей отдельных конденсаторов:

$$L_э = L_{э1} + L_{э2} + \ldots + L_{эm}, \quad (4.1.23)$$

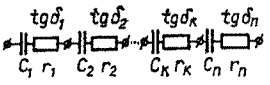
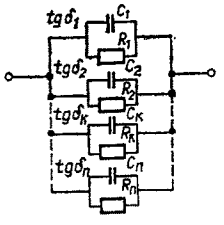
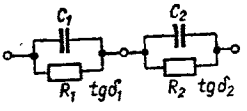
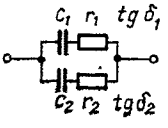
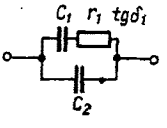
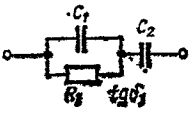
при параллельном соединении—

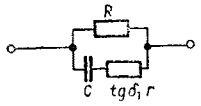
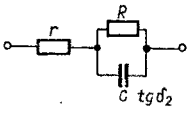
$$\frac{1}{L_э} = \frac{1}{L_{э1}} + \frac{1}{L_{э2}} + \ldots + \frac{1}{L_{эn}}. \quad (4.1.24)$$

В табл. 4.3.3 (см. § 4.3) приводятся значения эквивалентной индуктивности $L_э$ и резонансных частот некоторых типов конденсаторов.

Полная мощность и энергия конденсатора. Для некоторых типов конденсаторов, используемых в технике сильных токов при низкой частоте, а также в контурах мощных радиопередатчиков и электротермических установок высокой частоты, применяется такой параметр, как реактивная мощность конденсаторов. Для силовых конденсаторов эта мощность нормируется и является основным параметром,

Таблица 4.1.6

Вид соединения	Выражение для tgδ	Выражение для tgδ при $tg\delta_1 \ll 1$, $tg\delta_2 \ll 1$
	$$tg\delta = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} \left(\prod_{k=1}^{k=n} C_к \right) \cdot tg\delta_к}{\prod_{k=1}^{k=n} C_к}$$ при $n = 2$ $tg\delta = \frac{C_2 tg\delta_1 + C_1 tg\delta_2}{C_1 + C_2}$	$tg\delta = \frac{C_2 tg\delta_1 + C_1 tg\delta_2}{C_1 + C_2}$
	$$tg\delta = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} C_к tg\delta_к}{\sum_{k=1}^{k=n} C_к}$$ при $n = 2$ $tg\delta = \frac{C_2 tg\delta_2 + C_1 tg\delta_1}{C_1 + C_2}$	$tg\delta = \frac{C_2 tg\delta_2 + C_1 tg\delta_1}{C_1 + C_2}$
	$tg\delta = \frac{C_2 tg\delta_1 (1 + tg^2\delta_2) + C_1 tg\delta_2 (1 + tg^2\delta_1)}{C_2(1 + tg^2\delta_2) + C_1(1 + tg^2\delta_1)}$	$tg\delta = \frac{C_2 tg\delta_1 + C_1 tg\delta_2}{C_1 + C_2}$
	$tg\delta = \frac{C_2 tg\delta_2 (1 + tg^2\delta_1) + C_1 tg\delta_1 (1 + tg^2\delta_2)}{C_1(1 + tg^2\delta_2) + C_2(1 + tg^2\delta_1)}$	$tg\delta = \frac{C_2 tg\delta_2 + C_1 tg\delta_1}{C_1 + C_2}$
	$tg\delta = \frac{C_1 tg\delta_1}{C_1 + C_2(1 + tg^2\delta_1)} = \frac{tg\delta_1}{1 + (1 + tg^2\delta_1)\frac{tg\delta_2}{tg\delta_1}}$, где $tg\delta_1 = \omega r_1 C_1$; $tg\delta_2 = \omega r_1 C_2$	$tg\delta = \frac{C_1 tg\delta_1}{C_1 + C_2}$
	$tg\delta = \frac{C_2 tg\delta_1}{C_2 + C_1(1 + tg^2\delta_1)} = \frac{tg\delta_1}{1 + (1 + tg^2\delta_1)\frac{tg\delta_2}{tg\delta_1}}$, где $tg\delta_1 = \frac{1}{\omega R_1 C_1}$; $tg\delta_2 = \frac{1}{\omega R_1 C_2}$	$tg\delta = \frac{C_2 tg\delta_1}{C_1 + C_2}$

Вид соединения	Выражение для tgδ	Выражение для tgδ при $tg\delta_1 \ll 1$, $tg\delta_2 \ll 1$
	$tg\delta = \frac{1+\omega^2C^2r(R+r)}{\omega CR} = tg\delta_1 + tg\delta_2(1+tg^2\delta_1)$, где $tg\delta_1 = \omega rC$; $tg\delta_2 = \frac{1}{\omega RC}$	$tg\delta = tg\delta_1 + tg\delta_2$
	$tg\delta = \frac{r+R+\omega^2C^2rR^2}{\omega CR^2} = tg\delta_2 + tg\delta_1(1+tg^2\delta_2)$, где $tg\delta_1 = \omega rC$; $tg\delta_2 = \frac{1}{\omega RC}$	$tg\delta = tg\delta_1 + tg\delta_2$

вместо номинальной емкости. При работе конденсатора в цепи синусоидального переменного тока его полная мощность равна

$$S = U \cdot I, \qquad (4.1.25)$$

где U и I — действующие значения соответственно напряжения и тока.

Активная и реактивная мощности, потребляемые конденсатором от источника, соответственно равны:

$$P = UI\sin\delta; \quad Q = UI\cos\delta, \qquad (4.1.26)$$

где δ — угол, дополняющий до $\pi/2$ угол сдвига фаз между векторами тока и напряжения.

Активная мощность конденсатора измеряется в ваттах (Вт), а реактивная — в вольт-амперах (вар) или киловольт-амперах (квар).

Полная мощность конденсатора

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \qquad (4.1.27)$$

Поскольку угол сдвига фаз φ между током и напряжением близок к 90°, то можно считать, что мощность конденсатора является чисто реактивной, т. е. $S \approx Q$. Для современных силовых конденсаторов активная составляющая мощности, потребляемая от источника, на два—три порядка меньше, чем реактивная.

Реактивная мощность однофазного конденсатора вычисляется по формуле

$$Q = U^2\omega C_{рэ}, \qquad (4.1.28)$$

где U — действующее значение напряжения на конденсаторе; $C_{рэ}$ — емкость конденсатора согласно параллельной схеме замещения.

Для работы в сетях низкого напряжения (до 660 В включительно) выпускаются силовые конденсаторы в трехфазном исполнении. Секции в пакете делятся на три группы (фазы) и соединяются по схеме треугольника.

Реактивная мощность трехфазного конденсатора рассчитывается, как и для однофазного конденсатора, по формуле (ГОСТ 1282-79)

$$Q = U_л^2\,\omega C, \qquad (4.1.29)$$

где $U_л$ — линейное напряжение в цепи.

Значение емкости C трехфазного конденсатора, которое подставляется в (4.1.29), определяется согласно (ГОСТ 1282-79):

$$C = \frac{2}{3}(C_{13} + C_{23} + C_{31}), \qquad (4.1.30)$$

где C_{13}, C_{23}, C_{31} — значения емкостей, измеренные между выводами конденсатора.

Для компенсации реактивной мощности в трехфазных цепях используются и однофазные конденсаторы, которые разбиваются на три отдельные группы, соединяемые в треугольник или звезду.

При соединении в треугольник однофазных конденсаторов суммарная реактивная мощность группы конденсаторов вычисляется по формуле

$$Q_\Delta = 3U_л^2\,\omega\,C_\Delta, \qquad (4.1.31)$$

при соединении в звезду

$$Q_Y = U_л^2\,\omega\,C_\Delta, \qquad (4.1.32)$$

где $U_л$ — линейное напряжение в трехфазной цепи переменного тока; C_Δ и C_Δ — суммарная емкость на фазу при соединении в треугольник и звезду.

Различают номинальную и фактическую реактивную мощности конденсатора. *Номинальная* рассчитывается по номинальному значению емкости при номинальных напряжении и частоте; *фактическая* — по измеренному значению емкости (по параллельной схеме замещения) при заданных напряжении (в том числе и номинальном) и частоте.

При воздействии на конденсатор несинусоидального периодического напряже-

ния активную и реактивную мощности можно представить суммой мощностей от каждой гармоники:

$$P = \sum_{k=1}^{n} U_к^2 \omega_к C_к \operatorname{tg}\delta_к;$$
$$Q = \sum_{k=1}^{n} U_к^2 \omega_к C_к, \qquad (4.1.33)$$

где $U_к$, $C_к$ и $\operatorname{tg}\delta_к$ — действующее напряжение, эквивалентная емкость при параллельной схеме замещения и тангенс угла потерь конденсатора на частоте к-й гармоники; $\omega_к = к\omega_1$.

Энергия конденсатора. Накопленная энергия является важным параметром конденсаторов емкостных накопителей энергии:

$$W = \frac{CU^2}{2},$$

где C — емкость в фарадах (Ф); U — напряжение в вольтах (В). В системе СИ единицей измерения энергии конденсаторов является джоуль (Дж).

Различают номинальное и фактическое значения энергии конденсатора. *Номинальная* — это энергия конденсатора, рассчитанная при номинальном значении емкости и напряжения. Отличие фактического значения энергии конденсатора от номинального обусловлено в основном отклонением емкости и рабочего напряжения от номинальных значений (см. седьмую главу).

Кроме этого, из-за абсорбционных процессов и дипольной поляризации (см. § 2.2) фактическое значение накопленной и отданной в нагрузку энергии зависит от времени зарядки и разряда конденсатора.

Важнейшей характеристикой накопительных конденсаторов является *коэффициент использования энергии* $k_э$ — коэффициент полезного действия накопительного конденсатора [В.1]. Он зависит от соотношения эквивалентного активного сопротивления $r_{sэ}$ накопительного конденсатора в последовательной схеме замещения и сопротивления нагрузки $r_н$ (сопротивление разрядной цепи). Этот коэффициент вычисляется по формуле

$$k_э = \frac{r_н}{r_н + r_{sэ}}. \qquad (4.1.34)$$

Для его определения в (4.1.34) необходимо подставить значение активного сопротивления $r_{sэ}$ конденсатора на частоте $f_р = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{sэ}}}$ — при колебательном и на частоте $f = \frac{1}{2t_и}$ — при апериодическом, критическом или экспоненциальном характерах разряда. Здесь $C_{sэ}$ — эквивалентная емкость накопительного конденсатора (батарен) по последовательной схеме замещения; L — индуктивность разрядного контура; $t_и$ — длительность импульса разрядного тока (см. § 5.2).

§ 4.2. Ток утечки, сопротивление изоляции и коэффициент абсорбции конденсаторов

Ток утечки и сопротивление изоляции (постоянная времени саморазряда) — один из основных параметров конденсаторов для электронных и радиотехнических устройств.

Для конденсаторов с оксидным диэлектриком в нормативно-технической документации (НТД) указывается предельно допустимое значение тока утечки, а для конденсаторов с органическим и неорганическим диэлектриком — минимально допустимые значения сопротивления изоляции или постоянной времени саморазряда при заданной температуре окружающей среды.

В НТД для конденсаторов с $C_н \leqslant 0{,}1$—0,3 мкФ нормируется минимально допустимое значение сопротивления изоляции, а для конденсаторов с большим значением номинальной емкости — постоянная времени саморазряда конденсатора.

Ток утечки — это ток сквозной проводимости при постоянном напряжении. В связи с медленным спаданием во времени полного тока конденсаторов из-за абсорбции (см. § 2.2) в качестве тока утечки принимается значение полного тока конденсатора, измеренное через определенное время после подачи на конденсатор измерительного постоянного напряжения.

Следует различать *измеренное и истинное значения тока утечки* конденсатора. В НТД приводятся предельно допустимые значения измеренного тока утечки.

Измерение (определение измеренного значения) тока утечки конденсаторов производится по ГОСТ 21315.3-75.

Ток утечки конденсаторов с органическим и неорганическим диэлектриком определяют через одну минуту (одноминутное измерение) после подачи на конденсатор измерительного постоянного напряжения, с оксидным диэлектриком — после их выдержки под номинальным напряжением в течение времени, указанного в ТУ. Ток утечки неполярных конденсаторов с оксидным диэлектриком определяют при прямом и обратном их включениях. Для большинства конденсаторов с оксидным диэлектриком максимально допустимый ток утечки приводится при $T = 20°C$ и вычисляется по формуле [В.11]:

$$I_{ут} = kC_н U_н + m, \qquad (4.2.1)$$

где $I_{ут}$ — ток утечки, мА; m и k — коэффициенты, зависящие от типа и емкости конденсатора; $C_н$ — номинальная емкость, мкФ; $U_н$ — номинальное напряжение, В. В табл. 4.2.1 приведены значения коэффициентов k и m, входящих в выражение (4.2.1), для некоторых типов конденсаторов с оксидным диэлектриком. Наименьшие токи утечки, практически нулевые, имеют конденсаторы вакуумные и с газообразным диэлектриком, а с оксидным диэлектриком — могут достигать от единиц, до десятков тысяч микроампер (рис. 4.2.1).

Ток утечки зависит от напряжения, температуры, длительности хранения конденсаторов. На рис. 4.2.2 изображена ти-

Таблица 4.2.1

Тип конденсатора	k	m	Примечание
К50-3	$2\cdot10^{-4}$	$3\cdot10^{-3}$	$C_н U_н \leqslant 200$
	10^{-4}	0	$C_н U_н > 200$
К50-6	$5\cdot10^{-5}$	$3\cdot10^{-3}$	—
К50-7	$5\cdot10^{-5}$	$3\cdot10^{-2}$	—
К50-9	$5\cdot10^{-5}$	$2\cdot10^{-3}$	$U_н = 3$В
	$5\cdot10^{-5}$	$3\cdot10^{-3}$	$U_н = 6{,}3$ В
К50-12	$5\cdot10^{-5}$	10^{-2}	$C_н U_н < 1000$
	$5\cdot10^{-5}$	0	$C_н U_н \geqslant 1000$
К50-15	$5\cdot10^{-6}$	10^{-2}	$C_н U_н < 1000$
	$5\cdot10^{-6}$	$8\cdot10^{-3}$	$1000 < C_н U_н \leqslant 1500$
	$5\cdot10^{-6}$	$5\cdot10^{-3}$	$1500 < C_н U_н \leqslant 2500$
	$5\cdot10^{-6}$	0	$C_н U_н > 2500$
К50-19	$5\cdot10^{-5}$	0	—
К50-22	$2\cdot10^{-5}$	0	$U_н < 100$ В; $C_н U_н < 10^5$
	$3\cdot10^{-5}$	0	$U_н = 160$ В; $C_н U_н < 16\cdot10^3$
ЭТ, ЭТН	$5\cdot10^{-5}$	0	—
К52-1, К52-1А	$2\cdot10^{-6}$	10^{-3}	—
К53-11	10^{-4}	0	—
К53-12	$2\cdot10^{-4}$	0	—
К53-14	10^{-4}	10^{-2}	—
К53-15, К53-15А	$2\cdot10^{-5}$	0	—

пичная зависимость тока утечки оксидно-электролитических алюминиевых (К50) и оксидно-полупроводниковых (К53) конденсаторов от рабочего напряжения.

При длительном хранении без подключения под напряжение оксидно-электролитических конденсаторов их ток утечки увеличивается (рис. 4.2.3). Его возрастание связано с частичным разрушением оксидного слоя. Изменение тока утечки оксидных конденсаторов в процессе длительной эксплуатации значительно меньше, чем при хранении [В.10], т. е. хранение для этих типов конденсаторов является более тяжелым режимом, чем работа под напряжением. Ток утечки оксидно-полупроводниковых конденсаторов (К53) слабо изменяется как при хранении, так и в процессе эксплуатации [В.10], но с повышением температуры он возрастает (рис. 4.2.4).

Для конденсаторов с оксидным диэлектриком характерны случайные кратковременные скачки тока утечки при постоянном, неизменном во времени напряжении.

Непостоянство величины тока утечки, а также его значительный рост с повышением температуры может привести к нестабильной работе радиоаппаратуры, измерительной и счетно-решающей техники.

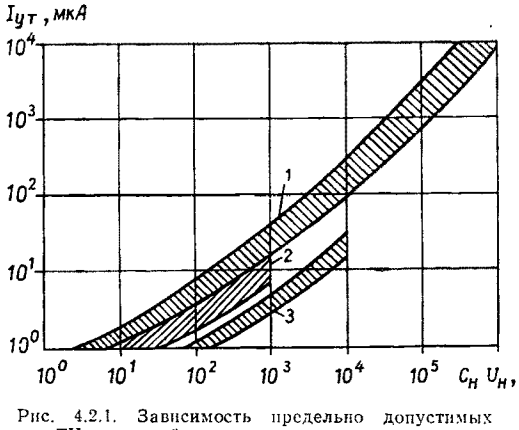


Рис. 4.2.1. Зависимость предельно допустимых по ТУ значений тока утечки конденсаторов с оксидным диэлектриком от произведения $C_н U_н$ при $T_0 = 20$°С: *1* — оксидно-электролитические алюминиевые (К50); *2* — оксидно-полупроводниковые (К53); *3* — объемно-пористые (К52) и оксидно-электролитические танталовые (К51)

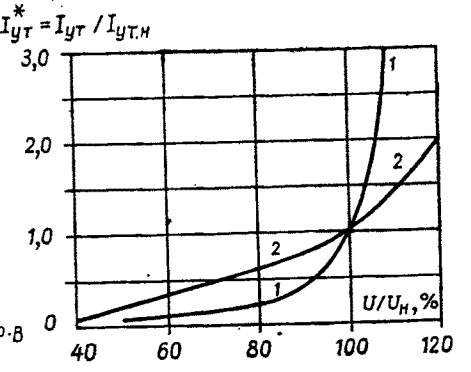


Рис. 4.2.2. Зависимость относительного значения тока утечки ($I^*_{ут}$) оксидно-электролитических алюминиевых (*1*), оксидно-полупроводниковых (*2*) конденсаторов от напряжения. $I_{ут.н}$ — значение тока утечки при $U_н$

Такая нестабильная, ненадежная работа может вызвать смещение потенциалов в устройствах (из-за роста тока утечки) и возникновение в схеме случайных помех из-за кратковременных изменений значений токов утечки.

Сопротивление изоляции. Сопротивление, оказываемое конденсатором току утечки $I_{ут}$, при приложении к его выводам постоянного напряжения U_0 называют сопротивлением изоляции конденсатора [В.1]:

$$R_{из} = \frac{U_0}{I_{ут}}. \qquad (4.2.2)$$

В связи с упомянутыми выше отличиями между измеренным и истинным значениями тока утечки конденсатора необходимо различать *измеренное* и *истинное* (определяемое сквозным током утечки, см. § 2.2) *значения* сопротивления изоляции.

Исследования [4.7] показывают, что истинное значение сопротивления изоляции конденсаторов с твердым органическим диэлектриком на два—три порядка больше измеренного по ГОСТ 21315.2-75, что объясняется подавляющим вкладом абсорбционного тока в измеренном значении полного тока таких конденсаторов при «одноминутном измерении» $I_{ут}$.

Измерения $R_{из}$ конденсаторов, применяемых в электронной аппаратуре, производятся по ГОСТ 21315.2-75.

Токи утечки в пленочных конденсаторах очень малы и их трудно измерить даже с помощью зеркального гальванометра. Поэтому для определения сопротивления изоляции таких конденсаторов прибегают к использованию метода саморазряда [В.2]. Этот же метод рекомендуется применять при контроле сопротивления изоляции силовых (ОСТ 16.0.686.569-77), а также для оценки качества высоковольтных конденсаторов.

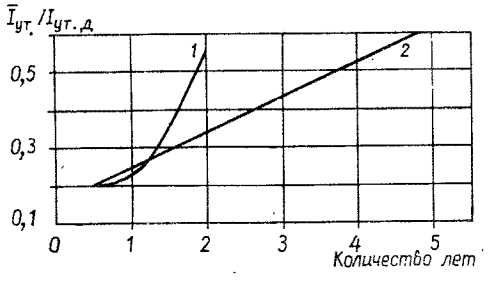


Рис. 4.2.3. Зависимость отношения $I_{ут}/I_{ут.д}$ от времени хранения конденсаторов ЭТО (*1*) К52-2 и ЭТ (*2*). $I_{ут}$ - среднее значение тока утечки партии конденсаторов после 10 мин тренировки; $I_{ут.д}$ — предельно допустимое значение тока утечки при +20°С по данным ТУ

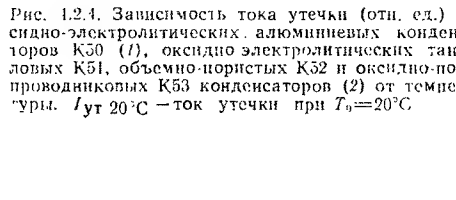


Рис. 4.2.4. Зависимость тока утечки (отн. ед.) оксидно-электролитических алюминиевых конденсаторов К50 (*1*), оксидно электролитических танталовых К51, объемно-пористых К52 и оксидно-полупроводниковых К53 конденсаторов (*2*) от температуры. $I_{ут\ 20°C}$ — ток утечки при T_0=20°С

В этом случае испытуемый конденсатор заряжается до напряжения U_0 и выдерживается под ним в течение некоторого времени. Затем конденсатор отключается от источника постоянного напряжения и снимается изменение напряжения на обкладках конденсатора во времени. Напряжение на обкладках испытуемого конденсатора необходимо измерять прибором с большим входным сопротивлением, например электростатическим вольтметром типа С50, С70 и т. д. Сопротивление изоляции вычисляется по формуле

$$R_{из} = \frac{0{,}437 \cdot t}{C(\lg U_0 - \lg U_1)},$$

где U_0 и U_1 — напряжения на конденсаторе соответственно в момент начала саморазряда и по истечении времени t; C — емкость конденсатора, Ф; t — время с начала саморазряда, с.

Очевидно, что и в этом методе измеренное сопротивление изоляции за счет явления абсорбции будет зависеть от времени выдержки конденсаторов под напряжением и от момента измерения напряжения U_1, и также будет меньше, чем истинное сопротивление изоляции, определяемое сквозным током.

В нормативно-технической документации на конденсаторы приводится *минимально допустимое измеренное значение сопротивления* изоляции при определенной температуре или диапазона температур, которое используется для контроля качества конденсаторов (соответствия ТУ).

С повышением температуры измеренное значение сопротивления изоляции конденсаторов уменьшается. Характер изменения $R_{из}$ с температурой такой же, как и у тока утечки. Если сопротивление изоляции измерено при температуре T_1, то его значение при температуре T_2 можно вычислить по формуле [В.1, ГОСТ 21315.2-75]:

$$\lg R_2 = \lg R_1 + B(T_1 - T_2),$$

где R_1, R_2 - сопротивление изоляции при температуре T_1 и T_2.

Коэффициент B для конденсаторов с органическим диэлектриком имеет величину порядка 0,03—0,04, для конденсаторов с неорганическим диэлектриком (в том числе и для оксидных)—0,010—0,015 [В.1].

Для конденсаторов большой емкости ($C_н$>0,1—0,3 мкФ), у которых преобладает объемный ток утечки (см. § 2.2), при характеристике их качества более удобным параметром является *постоянная времени саморазряда* $\tau_{из}$, которая равна произведению сопротивления изоляции $R_{из}$ на значение номинальной емкости $C_н$ и выражается в МОм·мкФ, Ом·Ф или секундах.

Таблица 4.2.2

Вид конденсатора	Сопротивление изоляции $R_{из}$, МОм	Постоянная времени $\tau_{из}$, с
Керамический высокочастотный	10^4—10^5	—
Керамический низкочастотный	$(1—10)\cdot10^3$	—
Слюдяной	$(7{,}5\cdot10^3)\cdot(5\cdot10^4)$	—
Стеклянный	$(1—5)\cdot10^4$	—
Бумажный фольговый герметизированный	$(2—20)\cdot10^3$	2000—4000
Металлобумажный	$(4—50)\cdot10^2$	200—1000
Полистирольный	$(5—10)\cdot10^4$	5000
Фторопластовый	$(2—10)\cdot10^4$	$(5—10)\cdot10^3$
Полиэтилентерефталатный	$2{,}5\cdot10^3$—10^5	500—8000
Поликарбонатный	10^4	—
Комбинированный (бумажно-пленочный) диэлектрик	10^4—$5\cdot10^4$	—
Воздушный	10^3	—
Вакуумный	10^7	—

Постоянная времени саморазряда таких конденсаторов зависит только от качества диэлектрика [В.1] и не зависит от формы и размеров конденсатора, номинальной емкости и номинального напряжения. Так же, как и для $R_{из}$, необходимо различать измеренное и истинное значения постоянной времени саморазряда конденсатора (под действием сквозного тока).

В НТД приводятся минимально допустимые значения сопротивления изоляции и постоянной времени конденсаторов при $T_0=20$°С (табл. 4.2.2).

Поскольку ток абсорбции и сквозной ток конденсаторов связаны с неоднородностью их диэлектрика, то на практике наблюдается большой разброс значений токов утечки, сопротивления изоляции и постоянной времени саморазряда.

Для однослойных конденсаторов с металлизированными обкладками (металлобумажных, металлопленочных, лакопленочных) эти разбросы связаны с дефектами диэлектрика, а также с некачественным самовосстановлением (см. § 2.5). Постоянная времени $\tau_{из}$ и сопротивление изоляции существенно зависят от температуры (рис. 4.2.5—4.2.7). Сопротивление изоляции (постоянная времени $\tau_{из}$) конденсатора зависит от напряженности электрического поля, причем с ростом напряженности значение $\tau_{из}$ падает (рис. 4.2.8).

Абсорбцию характеризуют коэффициентом абсорбции:

$$k_a=\frac{u_2}{u_1}\cdot100\%,$$

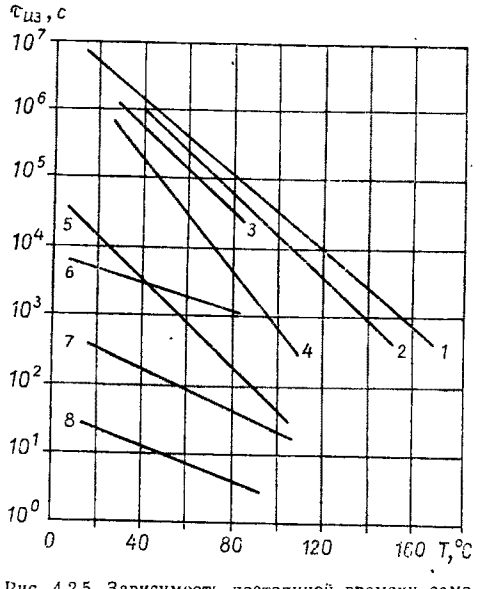


Рис. 4.2.5. Зависимость постоянной времени саморазряда фторопластовых (*1*), полиэтилентерефталатных (*2*), полистирольных (*3*), полиэтиленовых (*4*), бумажных с неполярной пропиткой (*5*), слюдяных (*6*), оксидно-электролитических сухих танталовых (*7*), оксидно-электролитических алюминиевых (*8*) конденсаторов от температуры [В.1, В.2]

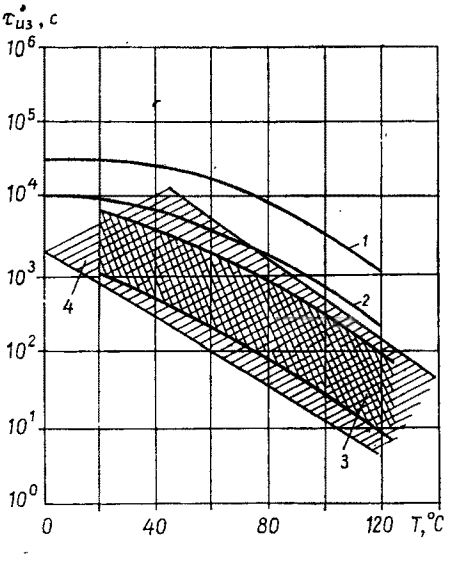


Рис. 4.2.6. Зависимость постоянной времени саморазряда поликарбонатных двухслойных (*1*), однослойных (*2*), с комбинированным диэлектриком (ПЭТФ + бумага) (*3*) и пленочных полиэтилентерефталатных (*4*) конденсаторов от температуры

Таблица 4.2.3

Типы конденсаторов	Диэлектрик	Значение k_a (%) при t_3=5 с	
		t_1=15 мин, t_2=3 мин	t_1=25 ч, t_2=5-10 ч
ФТ, ФГТИ, серии К72	Фторопласт-4	0,01—0,05	0,05—0,10
ПСО, ПО, ПМ, МПГ, МПГО, серии К71	Полистирольная пленка	0,02—0,10	0,1—0,2
ПМГЦ, ПМГП, серии К73	Полиэтилентерефталатная (лавсановая) пленка	0,2—0,8	1,7—2,5
серии К77	Поликарбонатная пленка	0,1—0,3	0,6—0,9
КСО, КСОТ, КСГ, СГМ, К31У-3 и др.	Слюда	2—5	18—20
Бумажные фольговые КБГ, К40П-2, К40У-5, К40У-9 и др.	Бумага с неполярной пропиткой	0,6—2,0	30—32
Металлобумажные МБГ, МБГО, МБГИ, МБГТ, МБМ, К42-11 и др.	Бумага	2—5	39—40
Оксидные алюминиевые К50-3, К50-6, К50-7, К50-24 К50-20, К50-22 и др.	Окись алюминия	5—6	До 15
Танталовые жидкостные	Окись тантала	0,6—2,5	7—8
Танталовые оксидно-полупроводниковые	Окись тантала	2—5	9—10
Керамические, группа ТКЕ М1500	Керамика Т150	2—5	6—10
Керамические, группа Н30	Керамика Т900	5—15	20—47

где u_1 — напряжение на обкладках конденсатора при его зарядке в течение времени t_1; u_2 — напряжение, возникающее на выводах конденсатора через время t_2 после того, как он был закорочен на t_3, с (см. рис. 4.2.9). Этот коэффициент показывает, как велика доля замедленных видов поляризации. Величина коэффициента абсорбции зависит от интервалов времени t_1, t_2 и t_3. Обычно k_a определяется при t_1=3—15 мин, t_2=3—10 мин и t_3=2—5 с. В табл. 4.2.3 приведены значения коэффициента абсорбции (k_a) для различных видов конденсаторов [В.1, В.11] при T_0=20°С.

С ростом температуры коэффициент абсорбции увеличивается. Однако из-за снижения сопротивления изоляции с повышением температуры этот коэффициент, определяемый по изложенной выше методике, достигая некоторого максимума, падает.

Зависимость k_a от значений t_1, t_2, t_3 обуславливает определенную неоднозначность значений коэффициентов абсорбции. Поэтому представляется более удачным характеризовать абсорбцию набором относительных абсорбционных емкостей $C_i^* = C_{ai}/C_0$ и соответствующих постоянных времени $\tau_{ai}=R_{ai}C_{ai}$, не зависящих от продолжительности зарядки и разряда конденсатора, а также от момента наблюдения. Параметры R_{ai} и τ_{ai} находятся рас-

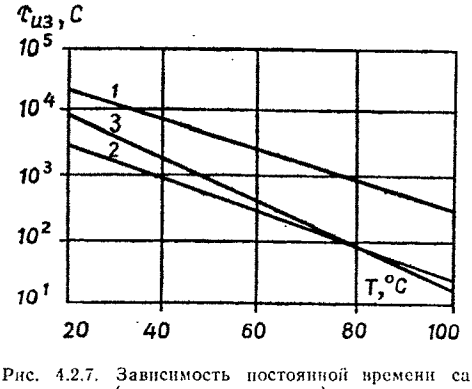


Рис. 4.2.7. Зависимость постоянной времени саморазряда (измеренное значение) от температуры. Вид диэлектрика: *1* — бумажно-лавсановый, пропитанный маслом; *2* — бумажный, пропитанный трихлордифенилом; *3* — бумажный, пропитанный пентахлордифенилом

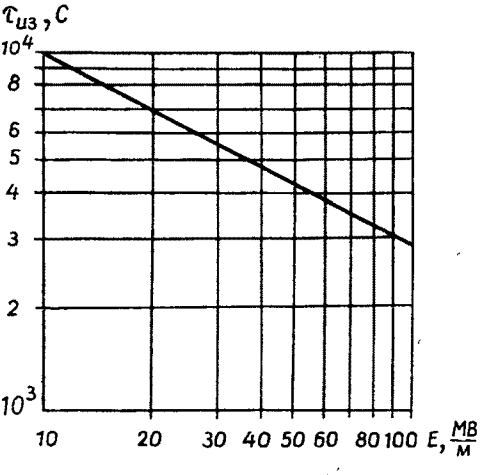


Рис. 4.2.8. Зависимость постоянной времени саморазряда конденсатора от напряженности электрического поля. Бумажная изоляция, пропитанная трихлордифенилом

четным путем с помощью ЭВМ по экспериментальным функциям спада абсорбционного тока и напряжения на конденсаторе при его саморазряде (см. § 4.3, приложение 1). При известных параметрах R_{ai}, C_{ai} и сопротивлении утечки значение напряжения, восстанавливающегося на зажимах конденсатора после его закорачивания, можно рассчитать для любых t_i,

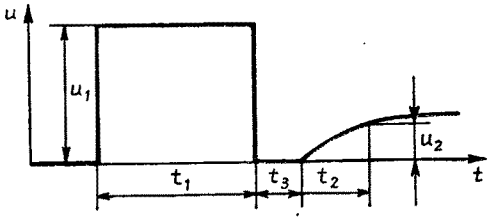


Рис. 4.2.9. Зависимость напряжения на конденсаторе от времени при определении коэффициента абсорбции

t_2, t_3. Так же, как для $R_{из}$ и $\tau_{из}$, следует различать истинное и измеренное значения коэффициента абсорбции k_a. Истинное значение k_a больше измеренного [4.8].

§ 4.3. Электрические схемы замещения конденсаторов

Схемы замещения конденсатора представляют собой изображение электрических цепей, состоящих из идеальных резистивных и реактивных элементов. Векторная диаграмма или частотные характеристики такой цепи и замещаемого конденсатора совпадают, т. е. они электрически эквивалентны на одной частоте или же в некотором диапазоне частот. Электрические схемы замещения необходимы для расчета мощности и энергии тепловыделения в конденсаторе (как их полных значений, так и составляющих потерь в отдельных элементах конструкции); частотных и временных характеристик; переходных и установившихся процессов в цепях, содержащих конденсаторы, и для других целей. Согласно теории цепей конденсатор представляет собой *пассивный*, т. е. не содержащий внутри себя источников энергии, двухполюсник. За исключением нелинейных конденсаторов (варикондов и некоторых других), емкость, tgδ у большинства конденсаторов очень слабо зависят от напряжения или тока. В связи с этим их схемы замещения обычно представляют в виде *линейных двухполюсников*.

Основные требования к схеме замещения — это ее эквивалентность (с заданной допустимой погрешностью) конденсатору, а также простота использования. Эквивалентность схемы замещения обеспечивается соответствующим выбором ее параметров — сопротивлений, емкостей и индуктивностей, тогда как простота — придани-ем ей определенной конфигурации. В зависимости от задач, решаемых с помощью схем замещения, они могут быть построены из различного числа элементов, которые отображают физические явления либо в конденсаторе в целом, либо в отдельных частях его конструкции с различной степенью полноты. Вследствие того, что физические процессы в металлических частях конденсатора и в его диэлектрике имеют различную физическую природу и по-разному себя проявляют, целесообразно рассматривать их схемы замещения раздельно. Это необходимо также при вычислении составляющих потерь в конденсаторе для более точного расчета его температурного поля.

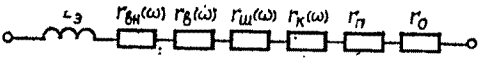


Рис. 4.3.1. Схема замещения токоведущих частей конструкции конденсатора: $r_в(\omega)$ — сопротивление выводов, $r_ш(\omega)$ — соединительных шинок, $r_к(\omega)$ — контактных узлов, $r_п$ — переходное от контактного узла к обкладкам, r_0 — обкладок, $r_{вн}(\omega)$ — вносимое от потерь в корпусе, крышке

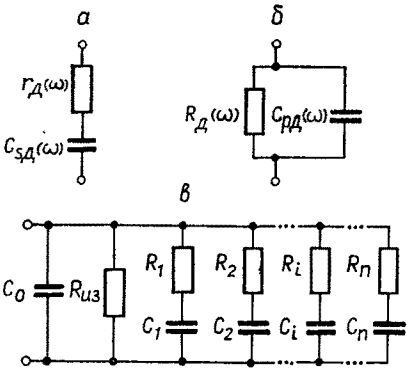


Рис. 4.3.2. Последовательная (*а*), простая (*б*) и усложненная (*в*) параллельные схемы замещения диэлектрика конденсатора

Схема замещения токоведущих металлических частей односекционного конденсатора строится исходя из того, что его рабочий ток протекает через последовательно соединенные выводы, внутренние соединительные шинки, контактные узлы и обкладки. Элементы конструкции образуют некоторую эквивалентную индуктивность $L_э$ и активные сопротивления (рис. 4.3.1). Кроме них в схеме показано вносимое сопротивление $r_{вн}(\omega)$, учитывающее потери в металлических нетоковедущих частях конструкции конденсатора (крышке и корпусе).

Некоторые активные сопротивления в схеме замещения изображены как частотно-зависимые в силу особенностей физических явлений в металлах. Для инженерных расчетов диэлектрик конденсаторов замещается следующими схемами: последовательной (рис. 4.3.2, *а*), простой параллельной (рис. 4.3.2, *б*) и параллельной усложненной (рис. 4.3.2, *в*), в которой резистивные и емкостные элементы учитывают физические явления, происходящие в диэлектрике.

Так, емкость C_0 (см. рис. 4.3.2, *в*) представляет собой сумму геометрической емкости конденсатора и емкости, обусловленной упругими видами поляризации. Резистор $R_{из}$ моделирует сопротивление диэлектрика конденсатора сквозному току. Цепочки R_iC_i (релаксаторы) отражают физические явления, связанные с замедленными видами поляризации. (C_i – емкости, обусловленные релаксационной поляриза-

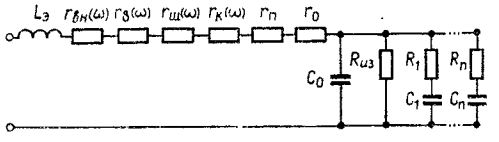


Рис. 4.3.3. Полная схема замещения конденсатора

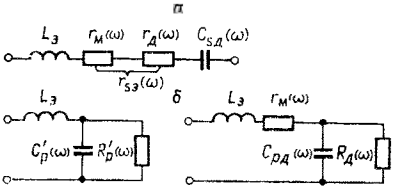


Рис. 4.3.4. Последовательная (*а*) и последовательно-параллельные (*б*) эквивалентные схемы замещения конденсаторов

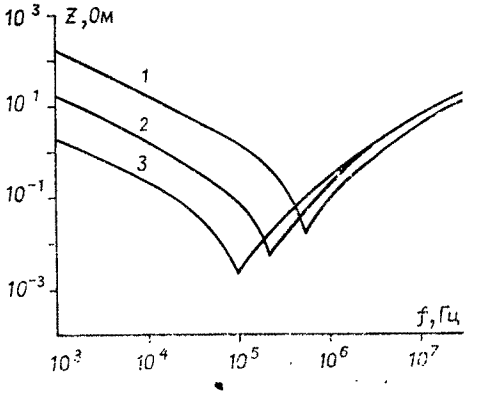


Рис. 4.3.5. Типичные зависимости полного сопротивления конденсаторов с выступающими обкладками от частоты для $C_н$ =1,0 (*1*); 10 (*2*) и 100 мкФ (*3*)

цией, и R_i — резисторы, учитывающие потери, сопутствующие ей.) Отличительной особенностью схемы замещения диэлектрика, показанной на рис. 4.3.2, *в*, является то, что ее параметры не зависят от частоты и она эквивалентна диэлектрику в широком диапазоне частот, что позволяет использовать ее для расчетов во временной области, тогда как схемы рис. 4.3.2, *а* и *б* допустимо применять только для расчетов частотными методами. Схемы замещения металлических частей и диэлектрика соединяются последовательно, образуя схему замещения односекционного конденсатора (рис. 4.3.3).

Для многосекционного конденсатора схема замещения строится из аналогичных схем в соответствии со схемой и конструкцией соединений секций. При исследованиях нелинейных свойств конденсаторов такие элементы, как $r_к$, r_0, некоторые цепочки R_iC_i диэлектрика в схеме замещения принимаются нелинейными, т. е. зависящи-

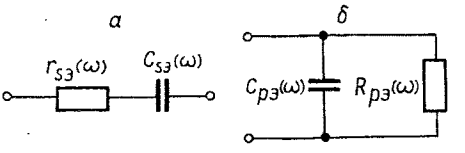


Рис. 4.3.6. Простейшие последовательная (*а*) и параллельная (*б*) эквивалентные схемы замещения конденсаторов

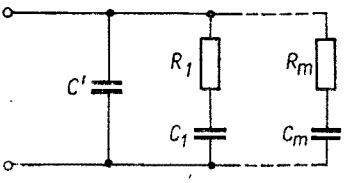


Рис. 4.3.7. Схема замещения конденсаторов с независящими от частоты параметрами элементов

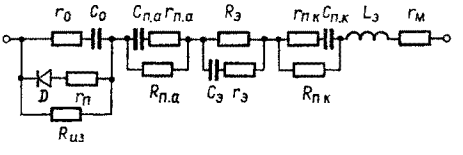


Рис. 4.3.8. Схема замещения оксидно-электролитического конденсатора при синусоидальном напряжении

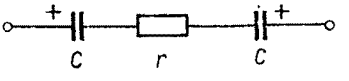


Рис. 4.3.9. Упрощенная эквивалентная схема замещения для неполярного оксидно-электролитического конденсатора (C=2 $C_н$)

ми от напряжения или тока. Это необходимо для анализа влияния нелинейности конденсаторов на работу устройств, а также при разработке методов отбраковки потенциально ненадежных конденсаторов. Представление конденсатора, являющегося, строго говоря, системой с распределенными параметрами, схемой с сосредоточенными параметрами, допустимо до тех частот, при которых геометрические размеры конденсатора существенно меньше длины электромагнитной волны в нем, т. е. приемлемо для большинства практических задач. При этом следует помнить, что длина волны в конденсаторе меньше, чем в вакууме, поскольку относительная

Таблица 4.3.1

Задача	Схема замещения конденсатора согласно рисунку
1. Расчет отдельных составляющих мощности и энергии тепловыделения в элементах конструкции конденсатора при периодических и непериодических воздействующих напряжениях сложной формы	4.3.3
2. Расчет переходных функций конденсаторов 3. Расчет токов через конденсатор 4. Расчет частотных характеристик конденсатора	4.3.4, *б*
5. Раздельное вычисление мощности тепловыделения в металле и диэлектрике при известном спектре тока через конденсатор	4.3.4, *а, в*
6. Расчет суммарной мощности тепловыделения в конденсаторе при известном спектре тока через него и расчет суммарной мощности тепловыделения при типовых (простых) формах тока	4.3.6, *а*
7. Расчет суммарной мощности тепловыделения в конденсаторе при известном спектре напряжения и расчет суммарной мощности тепловыделения при типовых (простых) формах напряжения	4.3.6, *б*
8. Расчет суммарной мощности и энергии тепловыделения в конденсаторе при периодическом и непериодическом напряжениях сложной формы	4.3.7

диэлектрическая проницаемость среды $\varepsilon_r > 1$.

Схему замещения конденсатора рис. 4.3.3 можно преобразовать в схемы, показанные на рис. 4.3.4,*а, б,* в которых резистивные, индуктивные и емкостные элементы являются некоторыми эквивалентными параметрами всего конденсатора. Представление конденсатора схемой замещения (рис. 4.3.4, *а*) хорошо согласуется с экспериментальными данными (рис. 4.3.5). Дальнейшее преобразование приводит к простейшим схемам замещения конденсатора (рис. 4.3.6, *а* и *б*), аналогичным схемам замещения его диэлектрика, но с другими значениями параметров. Для расчетов во временной области строится схема замещения конденсатора (рис. 4.3.7), близкая к схеме замещения диэлектрика (см. рис. 4.3.2), но отличающаяся от последней значениями параметров, а также меньшим числом элементов в связи с замещением конденсатора в более узком диапазоне частот (f_{max} обычно не превышает (0,8—0,9) f_0; f_0 — частота первого собственного резонанса конденсатора).

В табл. 4.3.1 приведены основные задачи, встречающиеся на практике, и указаны схемы замещения, которые целесообразно использовать при решении этих задач. В ряде случаев, например при расчете тока, схемы замещения конденсаторов дополнительно упрощаются в результате пренебрежения индуктивностью $L_э$, активным сопротивлением металлических частей $r_м$, некоторыми релаксаторами.

Схемы замещения оксидно-электролитических конденсаторов имеют ряд особенностей по сравнению, например, со схемами замещения конденсаторов с органическим диэлектриком, вследствие резкой неоднородности слоя оксидного диэлектрика и поляризационных слоев в электролите. Для полярных оксидных конденсаторов при синусоидальном напряжении схема замещения изображена на рис. 4.3.8. Особенность ее в том, что кроме основной емкости оксидного слоя диэлектрика в ней присутствуют емкости $C_{п.а}$, $C_{п.к}$ и резисторы $r_{п.а}$, $R_{п.а}$, $r_{п.к}$, $R_{п.к}$, учитывающие поляризационные слои у анода и катода, емкость $C_э$ и сопротивление электролита на постоянном $R_э$ и переменном токе $r_э$, а также диод Д с резисторами $R_{из}$ и $r_п$, отображающие униполярный характер проводимости и вид вольт-амперной характеристики оксидно-электролитических конденсаторов. Для широкого спектра частот каждая из емкостей в схеме замещения со своим сопротивлением r может быть заменена схемой замещения диэлектрика согласно рис. 4.3.2, *в*.

Схему замещения рис. 4.3.8 можно упростить и свести к схеме, показанной на рис. 4.3.7, или к более простой, например к схеме рис. 4.3.6, *б*.

При этом в последней сопротивление $R_{рэ}(\omega)$, как и для других видов конденсаторов, учитывает не только потери в оксидном слое, электролите, в поляризационных слоях, но и потери от тока сквозной проводимости. Схема замещения неполярного конденсатора в упрощенном виде изображена на рис. 4.3.9.

Определение параметров схем замещения конденсаторов

Параметры схем замещения находятся либо расчетным путем по данным конструкции конденсатора и по экспериментальным данным, либо непосредственными измерениями.

Расчет сопротивлений обкладок приведен в работах [В.1, В.3, 2.4, 2.5], а в табл. 4.3.2 даны формулы, позволяющие определять активные сопротивления токоведущих металлических частей конденсатора при известной его конструкции. Вследствие малой толщины обкладок поверхностный эффект в них не проявляется (за исключением обкладок вакуумных конденсаторов) и поэтому величина r_0 в любой

Таблица 4.3.2

Сопротивление	Величина сопротивления	Принятые обозначения
Выводов круглого сечения	$r_в = \frac{l}{d}\sqrt{\frac{f\mu}{\pi\gamma}}$	l и d — длина и диаметр выводов; μ и γ — соответственно абсолютная магнитная проницаемость и удельная проводимость металла выводов
Фольговых обкладок с контактным узлом по их длине	$r_0 = 2\rho\frac{b3+\Delta b}{ld_0}$	ρ — удельное сопротивление материала обкладок; Δb — ширина закраины; l, b и d_0 — соответственно длина, ширина и толщина обкладок
Металлизированных обкладок	$r_0 = 2r_c\frac{b3+\Delta b}{l}$	r_c — удельное сопротивление слоя металлизации в омах, рассчитанное на единицу поверхности
Фольговых скрытых обкладок	$r_0 = \frac{2}{3n^2}\rho\frac{l}{bd_0}$	n — число пар вкладных контактов, равномерно распределенных по длине обкладок

схеме замещения — это частотно-независимое сопротивление. Если активные сопротивления таких металлических частей конструкции, как выводы, соединительные проводники, перемычки, обкладки можно рассчитать или непосредственно измерить, то расчет сопротивлений $r_{вн}$, $r_п$ и $r_к$ (см. рис. 4.3.3) уже представляет значительные трудности. Поэтому сопротивление $r_{вн}$ получают как разность измеренных значений r_s конденсатора с крышкой и корпусом и без них или же как разность измеренных значений активного сопротивления данных элементов конденсатора и активного сопротивления выводов. Это сопротивление так же, как и сопротивление выводов, частотно-зависимое. Сумма сопротивлений $r_п$ и $r_к$ рассчитывается по формуле

$$r_п + r_к = r_s - r_0 - r_в - r_д - r_{вн} - r_ш .$$

Определение величины полного сопротивления конденсатора на частоте первого резонанса f_0 (минимальные значения Z см. на рис. 4.3.5) дает информацию о $r_s = r_м + r_д$ (см. рис. 4.3.4) на этой частоте.

Значения $r_м$ у конденсаторов с металлизированными обкладками имеют значительный разброс (рис. 4.3.10). Он вызывается разбросом значений сопротивлений обкладок r_0, обусловленных разбросами сопротивлений слоя металлизации r_c. Разброс $r_м$ связан также с разбросами переходного сопротивления контактного узла $r_п$ из-за неравномерности контактирования с ним обкладок по длине (наличие пропусков контактирования, участков с повышенным переходным сопротивлением и т. д.). Эквивалентную индуктивность конденсатора $L_э$ определяют различными методами (ГОСТ 21315.8-75), например, на частоте первого резонанса напряжения

$$L_э = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C_{эд}(f_0)},$$

где $C_{эд}(f_0)$ — расчетное значение емкости в последовательной схеме замещения диэлектрика (см. рис. 4.3.2, *а*) на частоте f_0.

Эквивалентная индуктивность $L_э$ у конденсаторов с секциями при выступающих обкладках слабо зависит от емкости. Она определяется в основном длиной внутренних соединительных проводников, выводов, их конструкцией и находится в пределах от десятых до сотых долей микрогенри.

Индуктивность $L_э$ конденсаторов с секциями со скрытыми обкладками существенно зависит от числа и расположения вкладных контактов [В.4, В.6] и находится в пределах от единиц наногенри у импульсных конденсаторов до единиц микрогенри у силовых конденсаторов для повышения коэффициента мощности (табл. 4.3.3). Параметры схемы замещения диэлектрика (см. рис. 4.3.2, *б*) получаются непосредственно из его характеристик ε и $\mathrm{tg}\delta_д$ или из составляющих комплексной диэлектрической проницаемости ε_r' и ε_r'':

$$C_{рд} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d};\quad \mathrm{tg}\delta_д = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'};\quad R_д = \frac{d}{\omega\varepsilon_0\varepsilon'' S_0},$$

которые находятся экспериментальным путем.

Параметры последовательной схемы замещения диэлектрика (рис. 4.3.2, *а*) опре-

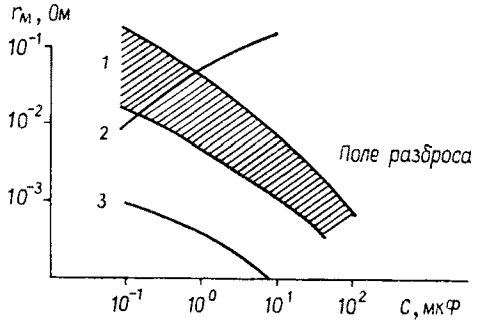


Рис. 4.3.10. Зависимость эквивалентного активного сопротивления металлических частей конструкции от емкости конденсаторов низкого напряжения в немагнитных корпусах при частоте 10^4 Гц. Конденсаторы с металлизированными обкладками (*1*); односекционные со скрытыми фольговыми обкладками (*2*); с выступающими фольговыми обкладками (*3*)

Таблица 4.3.3

Типы конденсаторов	Номинальная емкость $C_н$, пФ* и мкФ**	Индуктивность $L_э$, нГн	Частота первого резонанса f_0, мГц
Керамические:			
КД-1, КД-2а	1—270*	1—4	150—5000
КД-2в	680—6800*		200—30
КМ-3, КМ-4	2,2—3600,0*		1000—30
КМ-5, КМ-6	3900—15 000*		60—10
К10-7, К10-17а	0,022—0,100**	2—5	20—7
К10-20, К10-26	0,15—1,00**		6—2
К10-28а, К10-34а	1,5—2,2**		2,0—1,5
К10-9, К10-17в	5,6—2700,0*		2000—70
К10-33, К10-34в	3300—15 000*		120—20
К10-43в, К10-47в	0,022—0,150**	0,25—2,00	30—10
	0,22—1,00**		7—3
	1,5—6,8**		3—1
КТ-1, КТ-2	1—1000*	3—15	3000—40
КТ-3	1100—33 000*		90—10
КВИ	1,5—4700,0*	1—3	4000—40
К15-5	6,8—2200,0*	5—10	200—30
	3300—15 000		40—10
К15У-1	1—4700*	2—5	3000—30
К15У-3	5100—10 000*		50—20
Слюдяные:			
КСО-1, КСО-2, КСО-5	10—180*	3—5	1000—250
КСОТ, СГМ	200—1000*		200—100
	1100—5100*		75—30
КСО-6	10—130*	8—15	300—100
	200—1000*		100—40
КСО-13	1100—5100*		20
	5600—20 000*	8—15	20—10
	2200—50 000*		10—6
Стеклокерамические стеклянные:			
СКС, СКМа	5600—10 000*	3—5	30—15
К22-5, К21-7	22 000—47 000*		20—10
Бумажные, фольговые и металлизированные, пленочные в цилиндрических корпусах:			
К42У-2			
К72П-6, К72-11, ФТ, МПО, МПГ-Ц, ПМ, К71-4, К71-8, К73-11, К73-15, К73-16, К73-22, К76-3, К76-4, К76-5 К77-1, К77-2, К78-1, К78-2	1000*—22**	6—20	15,0—0,15
Бумажные, фольговые и металлизированные, пленочные в прямоугольных корпусах:			
МБГП, МБГО, МБГТ, МПГП, МПГО, ПМГП, К71-7, К73-9, К73-17, К73П-3	0,01—4,70** 6,0—30,0**	10—40 50—100	2,50—0,35 0,3—0,1
Объемно-пористые и оксидно-полупроводниковые:			
ЭТО-1	0,033—1,0**	3—5	12,0—1,5
ЭТО-2	1,0—10,0**	5—10	3,0—0,7
К52-1	10—80**	15—20	0,7—0,2
К52-2	100—1000**	20—40	0,15—0,035

деляются либо пересчетом параметров параллельной схемы, либо непосредственными измерениями. Для пересчета параметров простейших схем замещения диэлектрика можно воспользоваться следующими формулами.

Для последовательной схемы замещения:

$$C_{sд}^{(\omega)} = C_{pд}(\omega)\frac{1+[\omega R_д(\omega)C_{pд}(\omega)]^2}{[\omega R_д(\omega)C_{pд}(\omega)]^2} = C_{pд}(\omega)[1+(\mathrm{tg}\delta_д(\omega))^2]; \quad (4.3.1)$$

$$r_д(\omega) = \frac{R_д(\omega)}{1+[\omega R_д(\omega)C_{pд}(\omega)]^2} = \frac{R_д(\omega)[\mathrm{tg}\delta_д(\omega)]^2}{1+[\mathrm{tg}\delta_д(\omega)]^2}. \quad (4.3.2)$$

Значение

$$\mathrm{tg}\delta_д(\omega) = \omega r_д(\omega)C_{sд}(\omega). \quad (4.3.3)$$

Для параллельной схемы замещения:

$$C_{pд}(\omega) = \frac{C_{sд}(\omega)}{1 + [\omega r_д(\omega) C_{sд}(\omega)]^2} = \frac{C_{sд}(\omega)}{1 + [\mathrm{tg}\delta_д(\omega)]^2}; \quad (4.3.4)$$

$$R_д(\omega) = r_д(\omega) \frac{1 + [\omega r_д(\omega) C_{sд}(\omega)]^2}{[\omega r_д(\omega) C_{sд}(\omega)]^2} = r_д(\omega) \frac{1 + [\mathrm{tg}\delta_д(\omega)]^2}{[\mathrm{tg}\delta_д(\omega)]^2}. \quad (4.3.5)$$

Значение

$$\mathrm{tg}\delta_д(\omega) = \frac{1}{\omega R_д(\omega) C_{pд}(\omega)}. \quad (4.3.6)$$

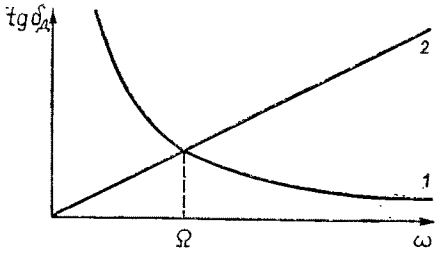


Рис. 4.3.11. Частотные зависимости тангенса угла потерь параллельной (*1*) и последовательной (*2*) схем замещения диэлектрика с постоянными не зависящими от частоты параметрами

Из этих формул следует, что при малых значениях $\mathrm{tg}\delta_д$, характерных для конденсаторных диэлектриков, величины $C_{pд}$ и $C_{sд}$ почти одинаковы (даже при $\mathrm{tg}\delta_д = 0{,}1$ они различаются всего на 1%). При постоянных параметрах, не зависящих от частоты, схемы замещения эквивалентны только на одной частоте $\omega = \Omega$, на которой измерялись C и $\mathrm{tg}\delta_д$. Это вытекает из частотных зависимостей $\mathrm{tg}\delta_д$ схем замещения (рис. 4.3.11).

На частотах $\omega \neq \Omega$ эквивалентность будет обеспечена уже при других параметрах схем замещения — т. е. параметры этих схем зависят от частоты:

$$r_д(\omega) = \frac{\mathrm{tg}\delta_д(\omega)}{\omega C_{sд}(\omega)};$$

$$R_д(\omega) = \frac{1}{\omega C_{pд}(\omega)\,\mathrm{tg}\delta_д(\omega)}.$$

Частотно-независимые параметры усложненной схемы замещения диэлектрика (см. рис. 4.3.2, *в*) определяются из условия близости экспериментальной зависимости $\mathrm{tg}\delta_э(\omega)$ тангенсу угла потерь, рассчитанному на этих же частотах для схемы замещения [В.12, 4.9] (см. приложение 1):

$$\mathrm{tg}\delta_{с.з} = \frac{1}{\omega R_0 C_0 \left(1 + \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i/C_0}{1 + (\omega\tau_i)^2}\right)} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\omega\tau_i C_i/C_0}{1 + (\omega\tau_i)^2} \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i/C_0}{1 + (\omega\tau_i)^2}};$$

$$\tau_i = R_i C_i$$

или, пренебрегая изменением емкости с частотой,

$$\mathrm{tg}\delta_{с.з} \approx \frac{1}{\omega\tau_0} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\omega\tau_i C_i^*}{1 + (\omega\tau_i)^2} = \frac{1}{\omega\tau_0} + \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i^*}{\frac{\omega}{\omega_i} + \frac{\omega_i}{\omega}},$$

где $\tau_0 = C_0 R_0$; $C_i^* = C_i/C_0$; $\omega_i = 1/\tau_i$.

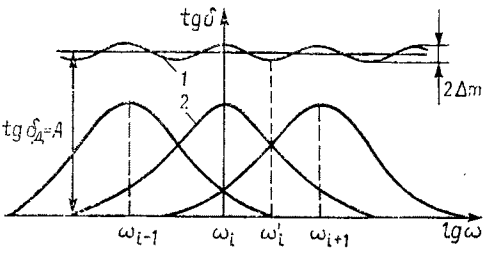


Рис. 4.3.12. Аппроксимация постоянного тангенса угла потерь (*1*) и вклад одного релаксатора (*2*)

Поскольку для нахождения параметров схемы замещения (R_i и C_i) используется частотная зависимость $\mathrm{tg}\delta_д(\omega)$, интегрально учитывающая все релаксационные виды поляризации, то каждая R_iC_i-цепочка в схеме замещения представляет некоторый суммарный эквивалент от нескольких видов, имеющих близкие постоянные времени релаксации, а не соответствует какому-то конкретному виду поляризации.

Это связано с тем, что один релаксатор R_iC_i в схеме замещения обуславливает существенный вклад в $\mathrm{tg}\delta_{с.з}$ только в диапазоне частот $\omega = \frac{0{,}1}{\tau} \div \frac{10}{\tau}$ (рис. 4.3.12), тогда как времена релаксации в диэлектрике даже одного вида поляризации могут отличаться на 4—5 порядков и более, т. е. каждый вид релаксационной поляризации учитывается соответствующими вкладами в нескольких R_iC_i-цепочках схемы замещения. Так как здесь происходит замена системы с распределенными параметрами схемой с сосредоточенными, то частотная характеристика схемы замещения (кривая 1 на рис. 4.3.12) не совпадает с исходной ($\mathrm{tg}\delta_д = A$ на рис. 4.3.12). Для постоянного в диапазоне частот ω_{min} и ω_{max} тангенса угла потерь параметры схемы замещения могут быть получены с помощью диаграммы рис. 4.3.13. Задавшись максимальной относительной ошибкой Δ_m/A (см. 4.3.12), по зависимости Δ_m/A находим параметр α^2, определяющий частотную «плотность»

релаксаторов R_iC_i. Величины $C_i^* = C_i/C_0$ получаем по зависимости C_i/AC_0 или с помощью аппроксимации $C_i^* = 2{,}9\ \mathrm{tg}\delta_д \lg\alpha$. Необходимое число релаксаторов при этом

$$n = E\left\{\frac{\lg\omega_{max} - \lg\omega_{min}}{2\lg\alpha}\right\} + 1.$$

Здесь $E\{x\}$ — целая часть от x, а частоты $\omega_i = \frac{1}{\tau_i}$ располагаются логарифмически равномерно $\omega_{i+1} = \alpha^2\omega_i$. Большинство конденсаторных диэлектриков удовлетворительно (с погрешностью аппроксимации $\mathrm{tg}\delta_д(\omega)$ не более $\pm 10\%$) замещается рассматриваемой схемой, если одна R_iC_i-цепочка приходится на декаду частотного диапазона. Так как конденсаторные диэлектрики, особенно полярные, кроме частотной имеют и значительные температурные зависимости ε_r и $\mathrm{tg}\delta_д$, то и параметры схемы замещения диэлектрика оказываются зависящими от температуры (см. приложение 1).

Параметры схемы замещения (см. рис. 4.3.2, *в*) диэлектрика конденсатора с сильной зависимостью $\varepsilon_r(\omega)$ можно находить по частотной зависимости $C_{pд}(\omega)$, используя соотношение

$$C_{pд}(\omega) - C_0 = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{1 + (\omega\tau_i)^2}.$$

Однако расчеты показывают, что для определения параметров схемы замещения только по характеристике $C_{pд}(\omega)$ при условии одновременной достаточно точной аппроксимации $\mathrm{tg}\delta_д(\omega)$ необходима очень высокая точность получения исходных данных и аппроксимации $C_{pд}(\omega)$. Погрешности этих операций не должны превышать $10^{-3}...10^{-4}$.

Менее жесткие требования к точности измерения и аппроксимации возникают, если параметры схемы замещения рис. 4.3.7 определять при $C' = 0$ одновременно по двум характеристикам:

$$C_{pэ}(\omega) = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{1 + (\omega/\omega_i)^2};$$

$$g(\omega) = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i\omega^2}{\omega_i\left[1 + (\omega/\omega_i)^2\right]}.$$

Активная проводимость параллельной схемы замещения (рис. 4.3.6, *б*) $g(\omega)$ вычисляется по формуле

$$g(\omega) = \omega C_{pэ}(\omega)\cdot\mathrm{tg}\delta(\omega),$$

в которую входят зависимости $C_{pэ}(\omega)$ и $\mathrm{tg}\delta(\omega)$, определяемые экспериментально.

В приложении 1 приведена программа нахождения параметров схемы замещения конденсатора (см. рис. 4.3.7) при $C' = 0$ по характеристикам $C_{pэ}(\omega)$ и $g(\omega)$.

Параметры схемы замещения диэлектрика (или конденсатора) можно определить не только по частотным зависимостям $C_{pэ}(\omega)$, $g(\omega)$ или $\mathrm{tg}\delta(\omega)$, но и по переходной функции (реакции на единичный скачок напряжения):

$$h(t) = \frac{1}{R_0} + \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i} e^{-t/R_iC_i},\quad i = Uh(t),$$

измеряя функцию спада тока через конденсатор i при подключении его к источнику постоянного напряжения.

В приложении 1 приведена программа расчета параметров схемы замещения по релаксационным составляющим тока конденсатора. Применение этого метода на практике связано со значительными экспериментальными трудностями, обусловленными большим диапазоном изменения тока

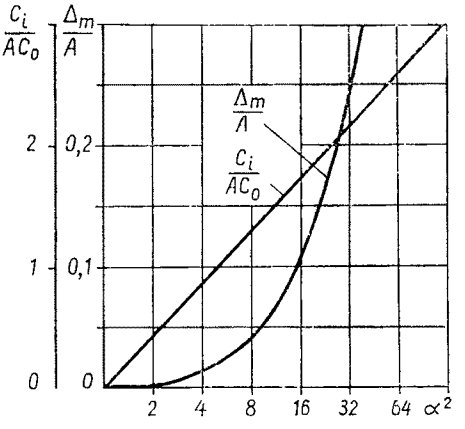


Рис. 4.3.13. Зависимость относительной максимальной ошибки аппроксимации Δ_m/A и параметра C_i/AC_0 от плотности распределения релаксаторов по частоте α^2 при $\mathrm{tg}\delta = .1 = \mathrm{const}$

конденсатора (5—10 порядков), а также необходимостью иметь высокостабильный источник напряжения с малыми пульсациями.

В последние годы предприняты попытки определения параметров схемы замещения кривой саморазряда конденсатора, который предварительно кратковременно заряжался от источника напряжения [4.7, 4.8]. Относительное напряжение на конденсаторе в процессе саморазряда приближенно представляется суммой

$$u/U_0 = \sum_{i=1}^{m} a_i e^{-t/\Theta_i},$$

где $\Theta_1 \ll \Theta_2 \ll ... \Theta_m$ — постоянные времени экспоненциальных составляющих мгновенного напряжения u. Емкости C_i и сопротивления R_i в схеме, показанной на рис. 4.3.7, связаны с коэффициентами a_i и Θ_i соотношениями

$$C_i = \frac{C' a_i}{\left(1 - \sum_{k=1}^{i} a_k\right)\left(1 - \sum_{k=1}^{i-1} a_k\right)};$$

$$R_i = \frac{\Theta_i\left(1 - \sum_{k=1}^{i-1} a_k\right)^2}{C' a_i}.$$

Для определения коэффициентов a_i и Θ_i по этому методу может использоваться программа, приведенная в приложении 1, упомянутая выше при определении параметров схемы замещения по функции спада тока, так как характер формул $h(t)$ и u одинаков.

Преимуществом этого метода является то, что от измерительной аппаратуры не требуется такого большого динамического диапазона, как при измерении функции спада тока, так как величина u в интервале времен наблюдений от единиц до сотен тысяч секунд для большинства конденсаторов различных типов и номинальных параметров изменяется в пределах одного-двух порядков.

Вместе с тем этому методу присущ такой недостаток, как необходимость измерения u с существенно меньшей, чем в случае измерения i, относительной погрешностью.

Кроме того, параметры a_i и Θ_i должны определяться из условия обеспечения существенно более низкой погрешности аппроксимации экспериментальной кривой u, чем при нахождении параметров по кривой i.

Эти особенности связаны со слабой чувствительностью кривой u к величинам емкостей релаксаторов C_i. Так, приближенный анализ показывает, что если при нахождении параметров с использованием характеристики i относительная погрешность при измерениях порядка 10% обуславливает максимальную погрешность определения параметров того же порядка, причем это сохраняется при любых соотношениях C_i/C_0, то при нахождении параметров по кривой саморазряда конденсатора относительная погрешность измерения u порядка 1% обуславливает максимальную погрешность определения параметров порядка 100% при $C_i/C_0 \approx 10^{-2}$,

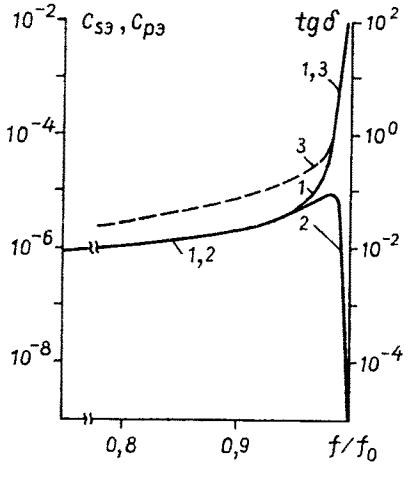


Рис. 4.3.14. Зависимость относительных значений эквивалентной емкости (*1*, *2*) и tgδ (*3*) конденсатора емкостью $C_н = 1{,}0$ мкФ при последовательной (*1*) и параллельной (*2*) схемах замещения (рис. 4.3.6, *а* и *б*) от относительной частоты $f^* = f/f_0$ при $r_м = 10^{-2}$ Ом и $\text{tgδ}_д = 10^{-2} = \text{const}$

даже если погрешность аппроксимации стремится к нулю.

Погрешность определения параметров по кривой u при $C_i/C_0 < 10^{-2}$ значительно выше.

В связи с этими обстоятельствами измерение u конденсатора целесообразно осуществлять компенсационным методом с погрешностью не более 10^{-3}—10^{-4}.

В табл. 1 приложения 1 приведены исходные данные и результаты расчетов коэффициентов a_i, Θ_i, а также параметров R_i, C_i, R_0 для ряда типов конденсаторов.

Допустимая относительная погрешность аппроксимации кривой u, осуществляемой при оценке параметров схемы замещения, для получения погрешности в определении параметров, не превышающей 10%, должна быть примерно такой же, как и погрешность при измерении u. Это существенно ограничивает возможности использования кривой саморазряда для нахождения параметров релаксаторов. Тем не менее данный метод достаточно точно дает возможность определять параметры схемы замещения конденсаторов, учитывающие явление абсорбции и сквозной ток конденсаторов [4.8].

Существенно менее жесткие требования к точности измерения характеристики и ее аппроксимации предъявляются в случае нахождения параметров схемы замещения диэлектрика по кривой восстановления напряжения на конденсаторе, который достаточно долго заряжался от источника постоянного напряжения, а затем кратковременно разряжался. Учитывая, что постоянные времени экспонент, составляющих кривую восстанавливающегося напряжения, удовлетворяют условию $\Theta_1 \ll \Theta_2 \ll \ldots \ldots \ll \Theta_m$, зависимости относительного напряжения на конденсаторе от времени приближенно можно представить в виде

$$\frac{u}{U_0} = \sum_{i=1}^{m} A_i \left(1 - e^{-t/\Theta_i}\right),$$

где $A_i = \dfrac{C_0 C_i}{\sum\limits_{i=0}^{i-1} C_i \sum\limits_{i=0}^{i} C_i}$;

$$\Theta_i = \frac{R_i C_i \sum\limits_{0}^{i=1} C_i}{\sum\limits_{0}^{i} C_i}; \quad A_m = \sum_{i=1}^{m-1} A_i;$$

$$\Theta_m = R_0 \sum_{i=0}^{m-1} C_i.$$

Используя программу (см. приложение 1) по экспериментальной зависимости восстанавливающегося на конденсаторе напряжения, определяем коэффициенты A_i, Θ_i и A_m, Θ_m, а затем параметры R_i, C_i и R_0. В качестве C_0 для последних двух методов определения параметров схемы замещения следует использовать емкость конденсатора, измеренную на частоте, по возможности близкой к $f = 10/\Theta_{min}$. Этим

Таблица 4.3.4

Характеристика	Цель использования характеристики
$\mathrm{tg}\delta(\omega)$	Для определения параметров схемы замещения диэлектриков (и конденсаторов) в области низких, средних и высоких частот со слабой зависимостью $\varepsilon(\omega)$ и $C(\omega)$ (для всех органических диэлектриков, а также для неорганических диэлектриков, имеющих $\mathrm{tg}\delta_д < 5\cdot10^{-2}$)
$C(\omega)$, $g(\omega)$	Для определения параметров схемы замещения диэлектриков и конденсаторов в области низких, средних и высоких частот с сильной зависимостью $\varepsilon_r(\omega)$ и $C(\omega)$, в частности для оксидно-электролитических конденсаторов
$h(t)$, u	Для определения параметров схемы замещения диэлектрика в области низких и инфранизких частот

путем удается определять параметры схемы замещения диэлектрика конденсаторов в области низких и инфранизких частот (для диапазона времени 10^{-2}—10^{-7} с). Недостаток этого метода — большая продолжительность эксперимента — примерно (6—8) τ_{max} (где τ_{max} — наибольшая постоянная времени R_iC_i-цепочки), тогда как для метода, использующего саморазряд конденсатора, это время в два раза меньше.

Во всех случаях получения экспериментальных характеристик во временной области так же, как и в частотной, для нахождения параметров моменты измерения целесообразно располагать логарифмически равномерно распределенными во времени или по частоте. Число наблюдений обычно нечетное и равно или более пяти за декаду.

Параметры схем замещения конденсатора (рис. 4.3.6, *а* и *б*) могут быть рассчитаны по формулам (4.3.1)—(4.3.6) с использованием измеренных значений $\mathrm{tg}\delta$ и $C_{pэ}(\omega)$ или $C_{sэ}(\omega)$.

Так, если известны параметры последовательной схемы замещения (рис. 4.3.6, *а*), то емкость $C_{pэ}(\omega)$ в параллельной схеме замещения конденсатора (рис. 4.3.6, *б*) рассчитывается по формуле (4.3.4), для чего предварительно находится величина $\mathrm{tg}\delta(\omega) = 2\pi f C_{sэ}(\omega) r_s(\omega)$, не зависящая от вида схемы замещения. В области частот, далеких от частоты первого резонанса конденсатора f_0, его емкости, измеренные по последовательной и параллельной схемам, в силу малости $\mathrm{tg}\delta$ практически совпадают. Однако в области частот, близких к резонансной, отличие $C_{sэ}(\omega)$ от $C_{pэ}(\omega)$ существенно возрастает (рис. 4.3.14). Значительное отличие этих емкостей наблюдается также у оксидно-электролитических конденсаторов.

Имеются также специальные установки, позволяющие измерять значения $r_{sэ}(\omega)$ в пределах 10^{-3}—10^3 Ом в широком диапазоне частот (10^2—10^6 Гц). Наконец, по программам (см. приложение 1), имея экспериментальные характеристики конденсатора $\mathrm{tg}\delta(\omega)$, $C_{pэ}(\omega)$, $g(\omega)$, переходную функцию $h(t)$, кривую саморазряда или кривую восстановления напряжения u, можно найти частотно-независимые параметры схемы замещения конденсатора в целом (см. рис. 4.3.7), аналогично тому, как это делается для диэлектрика. Области целесообразного применения этих характеристик для определения параметров схемы замещения приведены в табл. 4.3.4.

В связи с разбросом характеристик $\mathrm{tg}\delta(\omega)$, $C(\omega)$ параметры схемы замещения диэлектрика приобретают аналогичные разбросы, так что приходится применять экстремальные или средние значения параметров R_i и C_i. Имея параметры схемы замещения токоведущих частей и диэлектрика, несложно перейти к эквивалентным параметрам схемы замещения конденсатора. Так, для схемы рис. 4.3.6, *а*:

$$C_{sэ}(\omega) = \frac{C_{sд}(\omega)}{1 - 4\pi^2 f^2 L_э C_s} = \frac{C_{sд}(\omega)}{1 - (f/f_0)^2};$$

$$r_{sэ}(\omega) = r_м(\omega) + r_д(\omega),$$

где $C_{sд}(\omega)$—емкость по схеме рис. 4.3.4, *а* на частоте $\omega = 2\pi f$. Значения

$$C_{pэ}(\omega) = \frac{C_{sэ}(\omega)}{1 + [\mathrm{tg}\delta(\omega)]^2};$$

$$R_{pэ}(\omega) = r_д(\omega)\frac{1 + [\mathrm{tg}\delta(\omega)]^2}{[\mathrm{tg}\delta(\omega)]^2};$$

$$\mathrm{tg}\delta(\omega) = \omega r_{sэ}(\omega) C_{sэ}(\omega).$$

§ 4.4. Тепловые параметры и характеристики конденсаторов

Оценка и регламентация тепловых режимов конденсаторов особенно актуальны в связи с усиливающейся тенденцией к сокращению габаритов, с одной стороны, и резким возрастанием удельных тепловыделений — с другой. Отсутствие же в технической документации необходимых тепловых параметров не позволяет потребителю правильно оценить тепловой режим конденсатора в конкретных условиях применения, а следовательно, и сделать вывод о допустимости того или иного электрического режима.

Возможны различные варианты параметров, характеризующих тепловой режим конденсатора: допустимые превышения температуры корпуса конденсатора относительно температуры окружающей среды, максимальная температура конденсатора, реактивная и активная мощность и др.

Эти параметры не удовлетворяют всем или отдельно названным требованиям, таким как *независимость от вида и продолжительности воздействия электрической нагрузки и от активной мощности, рассеиваемой конденсатором; возможности экспериментального определения.*

Проведенные авторами систематические исследования показали, что наиболее рациональным параметром для регламентирования теплового режима конденсатора является тепловое сопротивление. Как известно, тепловым сопротивлением называется коэффициент пропорциональности между разностью температур двух изотермических поверхностей и тепловым потоком. Строго определение теплового сопротивления справедливо для постоянного теплового потока, протекающего между двумя изотермическими поверхностями, т. е. при отсутствии между ними стоков и истоков тепловой энергии. Для конденсаторов коэффициент пропорциональности между превышением температуры и мощностью теплового потока в различных случаях эксплуатации также может быть принят в качестве теплового сопротивления, поскольку для оценки теплового режима неважно, является ли $R_т$ истинным (в строгом смысле) тепловым сопротивлением или тепловым коэффициентом. Важно получить возможность определять превышение температуры конденсатора.

В дальнейшем используем термин «эквивалентное тепловое сопротивление», или просто — «тепловое сопротивление», принятый применительно к большинству типов конденсаторов со следующими допущениями:

— тепловое сопротивление конденсатора линейно, т. е. не зависит от температуры в диапазоне, соответствующем рабочему перепаду температур в конденсаторе;

— тепловое сопротивление не зависит от мощности тепловыделения и ее распределения по объему конденсатора;

— мощность тепловыделения принимается не зависящей от температурных перепадов в конденсаторе.

Взаимосвязь между тепловыделением и превышением температуры конденсатора в общем случае определяется соотношением

$$\vartheta(t) = P(0)\cdot R_т(t) + \int_0^t P'(\tau)\cdot R_т(t-\tau)\,d\tau, \qquad (4.4.1)$$

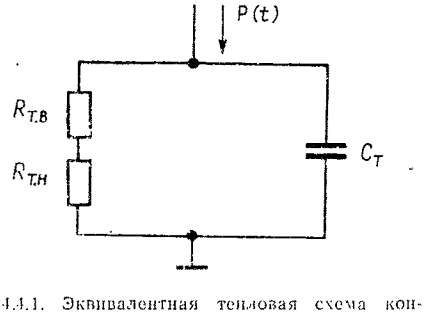


Рис. 4.4.1. Эквивалентная тепловая схема конденсатора

где $P(t)$ — мощность тепловыделения; $R_т(t)$ — переходное полное тепловое сопротивление конденсатора; $\vartheta(t)$ — мгновенное значение превышения температуры внутри конденсатора над температурой окружающей среды. Эквивалентная тепловая схема конденсатора (рис. 4.4.1) наиболее приемлема для описания переходных тепловых процессов в конденсаторе и регламентирования тепловых параметров в технической документации. Выражение для переходного полного теплового сопротивления конденсатора имеет вид

$$R_т(t) = R_т\left(1 - e^{-t/\tau_т}\right), \qquad (4.4.2)$$

где $\tau_т = R_т C_т$ — эквивалентная тепловая постоянная времени конденсатора; $R_т$ — установившееся значение переходного полного теплового сопротивления $R_т = \lim_{t\to\infty} R_т(t)$.

Такой закон изменения переходного теплового сопротивления $R_т(t)$ правомерен, строго говоря, лишь с момента наступления регулярного теплового режима нагревания или охлаждения конденсатора. Теория регуляризации температурных полей в телах с внутренними источниками тепла получила свое развитие в [4.11]. В стадии регулярного теплового режима температурное поле во всех точках тела изменяется по экспоненциальному закону. Автомодельность поля температур наступает независимо от характера начального распределения и мощности источников тепла в поле. Экспериментальные исследования и анализ конструкций конденсатора малых и средних размеров показывают, что в случае равномерного распределения источников энергии по объему регуляризация температурного поля наступает быстро, т. е. можно рассматривать только регулярный тепловой режим [4.12]. В случае стационарного теплового режима уравнение (4.4.1) имеет вид

$$\Theta = PR_т, \qquad (4.4.3)$$

где Θ — установившееся значение превышения температуры внутри конденсатора над температурой окружающей среды.

Различают *максимальное* $R_{тm}$ и *среднее* $R_{т.с}$ *полные тепловые сопротивления конденсатора:*

$$R_{тm} = \frac{\Theta_m}{P};\quad R_{т.с} = \frac{\Theta_с}{P}, \qquad (4.4.4)$$

где $\Theta_m = T_m - T_о$ — установившееся значение максимального полного превышения температуры; $\Theta_с = T_с - T_о$ — установившееся значение среднего полного превышения температуры; T_m — максимальная температура внутри конденсатора; $T_с$ — среднеобъемная (средняя по объему) внутренняя температура конденсатора.

Тепловой поток, выделяющийся в конденсаторе, распространяется через изоляцию, корпус и уходит в окружающую среду с наружной поверхности конденсатора. Таким образом, для пути следования теплового потока на части, можно разделить

Таблица 4.4.1

Особенность конструкции конденсаторов	Габаритные размеры, мм	Тепловые сопротивления, К/Вт		
		$R_{тm}$	$R_{т.вm}$	$R_{т.н}$
Со скрытой фольгой:				
низкого напряжения	175×110×165	1,66—1,86	0,9—1,10	0,76
	380×120×185	1,00—1,15	0,56—0,71	0,44
	380×120×325	0,40—0,47	0,16—0,23	0,24
	380×120×640	0,23—0,27	0,10—0,14	0,13
высокого напряжения	380×120×325	0,48—0,66	0,24—0,42	0,24
	380×120×640	0,24—0,39	0,14—0,26	0,13
С выступающей фольгой:				
низкого напряжения	380×120×325	0,30—0,35	0,06—0,12	0,24
высокого напряжения	380×120×325	0,38—0,42	0,14—0,18	0,24

на составляющие полное тепловое сопротивление конденсатора.

Для стационарного режима работы

$$R_т \quad R_{т.в} + R_{г.н}, \qquad (4.4.5)$$

где $R_{т.в}$ — внутреннее тепловое сопротивление конденсатора; $R_{т.н}$ — наружное тепловое сопротивление конденсатора.

На практике, в естественных условиях охлаждения конденсаторов, целесообразно задавать значения полных тепловых сопротивлений, как, например, это делается для конденсаторов, выпускаемых фирмой Siemens [4.13]. Для отечественных конденсаторов эти величины только вводятся в техническую документацию.

В приложении 3 приведены значения полных средних тепловых сопротивлений и тепловых постоянных времени конденсаторов различных типов, определенные экспериментально и уточненные расчетным путем.

Значения тепловых сопротивлений и тепловых постоянных времени приведены с некоторым запасом, учитывающим возможный разброс этих параметров. В приложении 4 даются программы и результаты расчетов тепловых сопротивлений конденсаторов на ЭВМ.

Внутреннее тепловое сопротивление конденсаторов

Внутренне тепловое сопротивление $R_{т.в}$ является индивидуальным тепловым параметром конденсатора и определяется наличием активной части, изоляционных прокладок, воздушных зазоров, масляных прослоек, корпуса и т. д. На его значение можно влиять на стадии конструирования, путем выбора материалов с большим коэффициентом теплопроводности и не допуская бо́льших, чем нужно с точки зрения электрической и механической прочности, толщин корпуса и изоляции.

Различают *максимальное* $R_{т.вm}$ и *среднее* $R_{т.в.с}$ *внутренние тепловые сопротивления* конденсаторов. Максимальное — используется для определения температуры наиболее нагретой точки (температуры теплового центра) конденсатора при известной мощности тепловыделения. Среднее — необходимо знать для расчета мощности тепловыделения в конденсаторах с сильной температурной зависимостью фактора потерь ($\mathrm{tg}\delta \times C$).

Максимальное и среднее внутренние тепловые сопротивления определяются соответственно из соотношений

Таблица 4.4.2

Особенность конструкции конденсаторов	Тепловые сопротивления, отн. ед.		
	$R^{*}_{т.в\,m} = \frac{R_{т.в\,m}}{R_{т.н}}$	$R^{*}_{т.в.с} = \frac{R_{т.в.с}}{R_{т.н}}$	$R^{**}_{т.в\,m} = \frac{R_{т.в\,m}}{R_{т.в.с}}$
Пропитанные с органическим диэлектриком:			
с выступающими фольговыми обкладками и металлическим корпусом	0,30—0,40	0,28—0,33	1,05—1,30
с выступающими фольговыми обкладками в пластмассовом корпусе	0,60—0,90	0,60—0,80	1,05—1,20
со скрытыми фольговыми обкладками и металлическим корпусом	0,35—0,50	0,30—0,36	1,20—1,40
с металлизированными обкладками и металлическим корпусом	0,70—1,10	0,35—0,60	1,60—2,00
Непропитанные с органическим диэлектриком:			
с металлизированными обкладками и металлическим корпусом	1,00—2,00	0,60—1,00	1,50—2,50
С оксидным диэлектриком	0,40—0,80	0,28—0,50	1,10—1,40

$$R_{\text{т.в}m} = \frac{\Theta_{\text{в}.m}}{P}; \qquad (4.4.6)$$

$$R_{\text{т.в.с}} = \frac{\Theta_{\text{в.с}}}{P}, \qquad (4.4.7)$$

где $\Theta_{\text{в}m} = T_m - T_{\text{к}}$ — установившееся значение максимального внутреннего превышения температуры; $\Theta_{\text{в.с}} = T_{\text{с}} - T_{\text{к}}$ — установившееся значение среднего внутреннего превышения температуры; $T_{\text{к}}$ — среднеповерхностная температура корпуса конденсатора. Величина внутреннего теплового сопротивления может быть определена как расчетным (§ 5.4 и приложение 2), так и экспериментальным путем. Для его экспериментальной оценки основной задачей является оценка температуры внутри конденсатора и мощности тепловыделения.

В практике конденсаторостроения для экспериментальной оценки температуры внутри конденсатора используются в основном контактные методы. Суть их состоит в непосредственном измерении температуры при помощи малогабаритных термопар или термисторов, встроенных в конденсатор. При реализации таких методов (особенно для малогабаритных конденсаторов) приходится нарушать целостность конструкции конденсатора; приклеивание термодатчиков приводит к значительным погрешностям из-за отвода тепла датчиками и проводами; встроенные термопары вносят изменения в конструкцию конденсатора и снижают его электрическую прочность; для некоторых конструкций, например для объемно-пористых структур, встраивание термопар практически невозможно. Поэтому достаточно эффективен косвенный метод оценки температуры, лишенный названных недостатков.

Приведем метод экспериментальной оценки внутреннего теплового сопротивления конденсатора [4.12]. Из соотношения (4.4.7) видно, что величина среднего внутреннего теплового сопротивления является частным от деления среднего внутреннего превышения температуры $\Theta_{\text{в.с}}$ на мощность тепловыделения P. При известных величинах P и $R_{\text{т.в.с}}$ в заданном режиме можно найти внутренний перегрев структуры конденсатора.

Оценка среднеобъемной температуры конденсатора производится косвенным путем. Суть ее в следующем. Измеряются температурные зависимости основных электрофизических параметров конденсаторов (C, tgδ, $R_{\text{из}}$, $I_{\text{ут}}$, Z) и проводится их анализ с целью выявления наиболее термочувствительного из них в требуемом интервале температур. Зависимость термочувствительного параметра (ТЧП) от температуры при равномерно прогретом объеме конденсатора (путем термостатирования) используется в дальнейшем в качестве градуировочной кривой. В процессе работы конденсатора на реальную электричекую нагрузку фиксируется изменение ТЧП в зависимости от среднеповерхностной температуры $T_{\text{к}}$ и впоследствии сравнивается с градуировочной кривой. Сравнение двух зависимостей позволяет определить среднеобъемную температуру $T_{\text{с}}$ конденсатора. Она пропорциональна максимальной температуре конденсатора T_m, т. е.

$$T_m - T_0 = K(T_{\text{с}} - T_0), \qquad (4.4.8)$$

где K — коэффициент пропорциональности, который для конденсаторов малых и средних размеров не превышает 1,2.

Таким образом, при известных температурах $T_{\text{с}}$ и $T_{\text{к}}$ с учетом соотношений (4.4.6)—(4.4.8) определяем максимальное и среднее внутренние тепловые сопротивления конденсатора. В табл. 4.4.1 приведены значения тепловых сопротивлений силовых конденсаторов, в табл. 4.4.2 — относительные значения тепловых сопротивлений конденсаторов для электронных и радиотехнических устройств.

Наружное тепловое сопротивление конденсаторов

Для нахождения наружного теплового сопротивления конденсатора можно воспользоваться уравнением теплоотдачи с поверхности:

$$P = \alpha(T_{\text{к}} - T_0)S_{\text{к}},$$

где $T_{\text{к}}$ — средняя температура поверхности корпуса конденсатора, °С; T_0 — температура охлаждающего воздуха, °С; $\alpha = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}$ — суммарный коэффициент теплоотдачи с поверхности корпуса, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\,\text{К}}$; $\alpha_{\text{л}}$ и $\alpha_{\text{к}}$ — коэффициенты теплоотдачи излучением и конвекцией; $S_{\text{к}}$ — площадь поверхности корпуса конденсатора, м². Тогда

$$R_{\text{т.н}} = \frac{1}{\alpha S_{\text{к}}}. \qquad (4.4.9)$$

Наружное тепловое сопротивление можно также рассчитать на основе экспериментальных данных по формуле

$$R_{\text{т.н}} = \frac{T_{\text{к}} - T_0}{P}, \qquad (4.4.10)$$

где $T_{\text{к}}$ и T_0 измеряются, P — рассчитывается.

Суммарный коэффициент теплоотдачи α, определяющий $R_{\text{т.н}}$, зависит от ряда факторов: температуры $T_{\text{к}}$, превышения температуры корпуса $\Theta_{\text{к}} = T_{\text{к}} - T_0$, геометрических размеров и формы, взаимного расположения конденсаторов в блоке и относительно постороннего источника теплового излучения (солнечной радиации, теплового излучения электромагнитных, полупроводниковых элементов и узлов аппаратуры, в которой работают конденсаторы), вида охлаждения (естественного, принудительного), давления воздуха, чистоты обработки, окраски и материала корпуса конденсатора и т. д. Коэффициенты теплоотдачи излучением α и конвекцией $\alpha_{\text{к}}$ могут быть определены по графикам и формулам, приведенным в [4.11]. Расчетные и экспериментальные зависимости $R_{\text{т.н}}$ для оди-

Таблица 4.4.3

Габаритные размеры (АхВхН), мм	Площадь поверхности, см²		Наружное тепловое сопротивление $R_{т.н}$, К/Вт	Примечание
	боковой S_1	крышки S_2		
158×158×300	1900	250	0,42	
172×110×165	930	189	0,76	
310×138×640	5750	428	0,12	
310×138×800	7160	428	0,12	
310×150×590	5320	466	0,15	
310×310×668	8300	960	0,10	Конденсаторы с прямоугольными корпусами
312×106×190	1580	332	0,45	
312×106×455	3800	332	0,19	
314×314×680	8550	986	0,09	
314×314×711	8900	986	0,09	
314×314×880	11500	986	0,09	
380×110×335	3210	420	0,25	
380×120×180	1850	455	0,43	
380×120×200	2000	455	0,40	Нулевой габарит
380×120×325	3250	455	0,24	Первый габарит
380×120×350	3500	455	0,22	
380×120×640	6400	455	0,13	
455×150×325	3950	683	0,19	
570×128×353	4950	730	0,16	Второй габарит
723×639×1010	27500	4600	0,028	
765×365×800	18000	2800	0,037	
800×362×800	18600	2900	0,04	
150×395	1860	176	0,42	Конденсаторы с цилиндрическими корпусами (Д×Н)
150×515	2420	176	0,34	
170×850	4440	227	0,19	
195×650	4000	300	0,2	

ночных конденсаторов от площади поверхности показаны на рис. 4.4.2. Для конденсаторов с поверхностью корпуса больше 0,010—0,015 м² совпадение экспериментально определенных и расчетных значений $R_{т.н}$ удовлетворительное.

Если поверхность корпуса $S_к < 0{,}01$ м², то между расчетными и экспериментальными значениями $R_{т.н}$ наблюдается различие (см. рис. 4.4.2) и тогда наружное тепловое сопротивление следует определять по рис. 4.4.3 или рис. 4.4.4.

В табл. 4.4.3 даются размеры корпусов конденсаторов большого габарита (силовых) и расчетные значения их наружных тепловых сопротивлений при $\Theta_к = 20$ К, $T_о = 40$°С и естественном воздушном охлаждении. Теплоотдача со дна корпуса не учитывалась, т. е. конденсаторы расположены на теплоизолирующем основании.

На практике широко применяется монтаж конденсаторов в блоках. На рис. 4.4.5,*а—з* изображены характерные конструкции блоков конденсаторов. Монтаж их выполняется на теплоизолирующем (текстолит, гетинакс) или металлическом каркасе, шасси. Условия теплоотдачи конденсаторов, находящихся в середине блока, ухудшаются, что приводит к значительно бо́льшему превышению температуры $\Theta_к$ по сравнению с одиночным конденсатором при прочих равных условиях, т. е. увеличивается $R_{т.н.бл}$.

Наружные тепловые сопротивления конденсаторов в блоке зависят от взаимного расположения конденсаторов.

В табл. 4.4.4 в качестве примера приводятся численные значения $R_{т.н.бл} / R_{т.н}$ для некоторых вариантов расположения конденсаторов с прямоугольными корпусами в блоках. Здесь наружное тепловое сопротивление $R_{т.н.бл}$ определено для конденсаторов, находящихся в середине блока

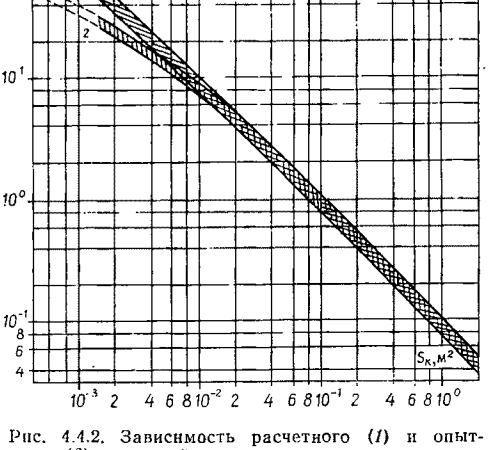


Рис. 4.4.2. Зависимость расчетного (*1*) и опытного (*2*) значений наружного теплового сопротивления от суммы площадей боковой поверхности корпуса и крышки конденсатора при $T_о = 50$°С и $\Theta_к = 10$ К

Таблица 4.4.4

Вариант расположения конденсаторов в блоках согласно рисунку	$R_{т.н.бл}/R_{т.н}$
4.4.5, *в*	1,5—1,8*) 2,2—2,5**)
4.4.5, *г*	1,9—2,1*) 2,5—3,0**)
4.4.5, *з*	2,5—3,0*) 3,7—4,0**)

*) Конденсатор установлен на металлическом основании,
**) — на теплоизолирующем.

и имеющих наибольшее превышение температуры корпуса $\Theta_к$. Зазоры между корпусами конденсаторов составляют 10—20 мм.

Для блоков из цилиндрических конденсаторов отношение $R_{т.н.бл}/R_{т.н}$ несколько ниже (приблизительно на 10—15%), чем приведенное в табл. 4.4.4. На рис. 4.4.6, *а* показаны зависимости $R_{т.н.бл}/R_{т.н}=R^*_{т.н.бл}$ для блока из малогабаритных конденсаторов (см. рис. 4.4.5, *ж*) от расстояния между конденсаторами, определенные экспериментально при $T_0=25°C$.

Зависимость относительного наружного теплового сопротивления $R^*_{т.н.бл}=\dfrac{R_{т.н.бл}}{R_{т.н}}$ силовых конденсаторов второго габарита от расстояния между ними при превышении температуры корпуса $\Theta_к=20$ К приведена на рис. 4.4.6, *б*.

Перфорация шасси, на котором производится монтаж конденсаторов, снижает наружные тепловые сопротивления конденсаторов в блочных конструкциях примерно на 10—30% по сравнению с блоками, установленными на шасси без перфорации. Снижение наружного теплового сопротивления как для одиночных конденсаторов,

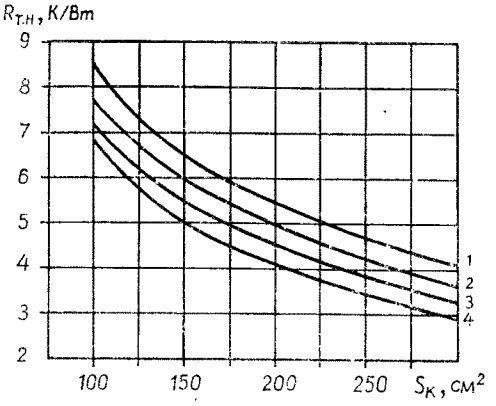


Рис. 4.4.3. Экспериментальная зависимость $R_{т.н}$ малогабаритных конденсаторов с прямоугольным корпусом при их вертикальном расположении от площади поверхности (боковая + крышка) корпуса $S_к$ и превышении температуры корпуса $\theta_к$ при $T_0=25°C$. $\theta_к$, К: *1*—5; *2*—10; *3*—20; *4*—30

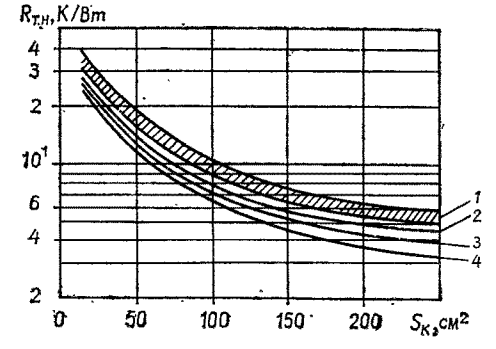


Рис. 4.4.4. Экспериментальная зависимость $R_{т.н}$ малогабаритных конденсаторов цилиндрической формы при их горизонтальном расположении от площади боковой поверхности корпуса $S_к$ и превышения температуры корпуса $\theta_к$ при $T_0=25°C$. $\theta_к$, К: *1*—5; *2*—10; *3*—20; *4*—30

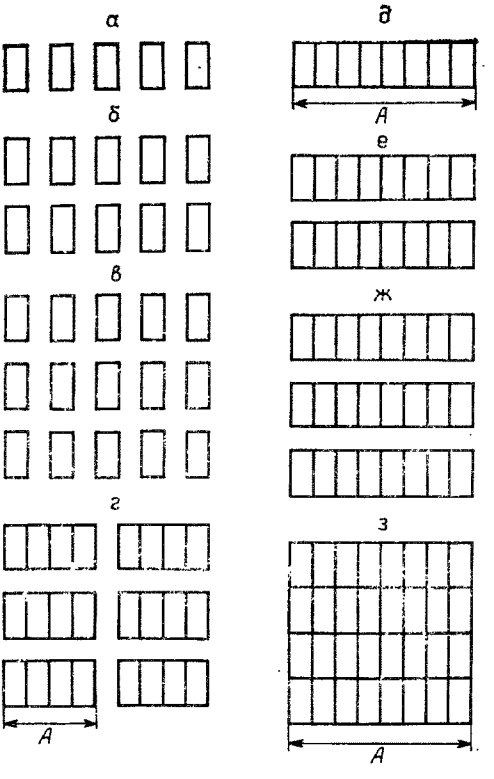


Рис. 4.4.5. Варианты расположения конденсаторов в блоках

так и для блоков имеет место при их принудительном обдуве.

Эффективность принудительного обдува зависит от соотношения между наружным $R_{т.н}$ и полным тепловым сопротивлением конденсатора $R_{тm}$. Чем больше доля $R_{т.н}$ в общем тепловом сопротивлении $R_{тm}$ конденсатора, т. е. чем больше отношение $R_{т.н}/R_{тm}$, тем эффективнее применение

принудительного охлаждения для снижения максимального превышения температуры диэлектрика Θ_m.

Для примера на рис. 4.4.7 показаны зависимости относительного наружного сопротивления $R^*_{т.н.\upsilon} = R_{т.н\upsilon} / R_{т.н}$ малогабаритных конденсаторов с металлизированными обкладками в прямоугольных корпусах от скорости обдува υ и расстояния между конденсаторами (см. рис. 4.4.5, *з, ж*), полученные экспериментально.

Зависимости относительного полного максимального теплового сопротивления $R^*_{тm} = \dfrac{R_{тm\upsilon}}{R_{тm}}$ конденсаторов различного конструктивного исполнения от скорости потока охлаждающего воздуха приведены

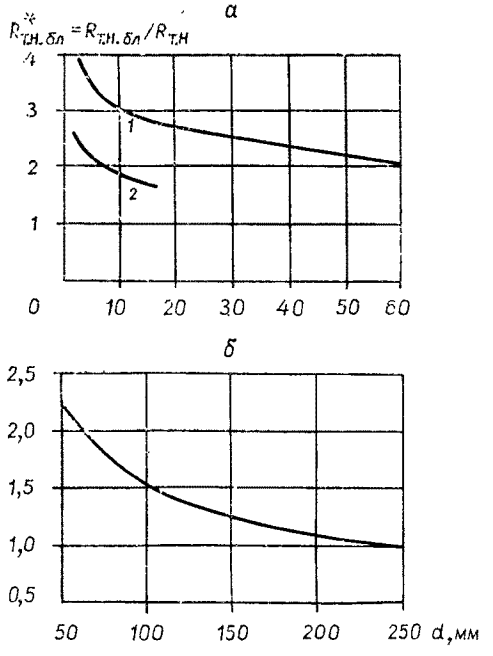


Рис. 4.4.6. Зависимость $R^*_{т.н.бл}$ малогабаритных (*а*) и силовых конденсаторов второго габарита (*б*) (в отн. ед.) от расстояния между ними при T_0=25°С, $\theta_к$ =20 К, расположенных на теплоизолирующем (*1*) и теплопроводящем (*2*) основаниях; $R_{т.н}$ — наружное тепловое сопротивление одиночного конденсатора; $R_{т.н.бл}$ — наружное тепловое сопротивление конденсатора в составе блока

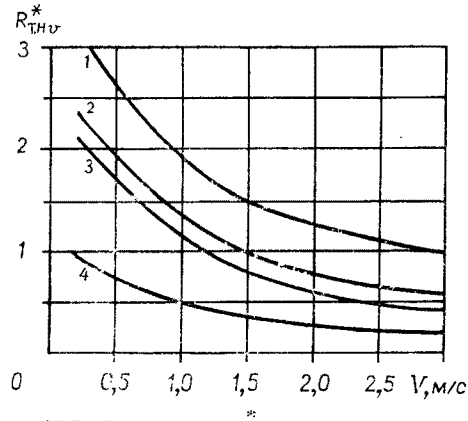


Рис. 4.4.7. Зависимость $R^*_{т.н\upsilon}$ малогабаритных конденсаторов с металлизированными обкладками от скорости обдува и расстояния между ними: *1* - для блока без зазоров (см. рис. 1.4.5,*з*); *2* и *3* с зазорами 10 и 20 мм соответственно (см. рис. 4.4.5,*ж*); *4*—для одиночного конденсатора

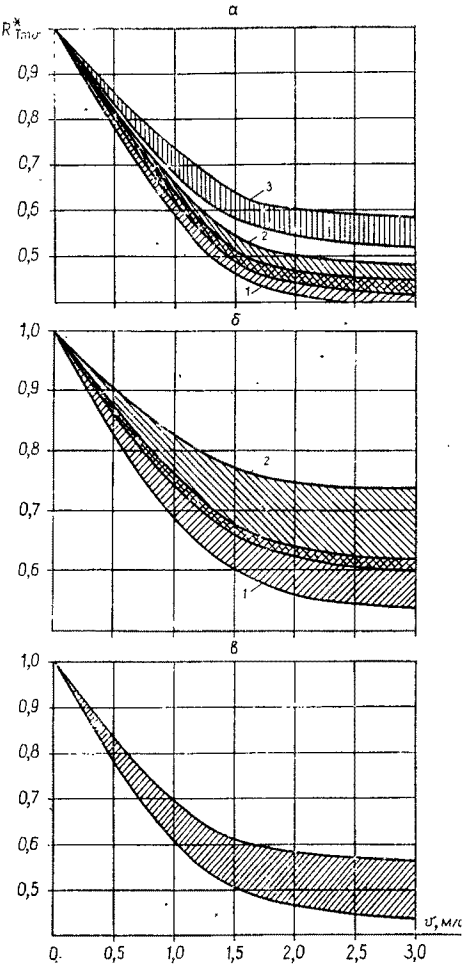


Рис. 4.4.8. Зависимость относительного полного максимального теплового сопротивления $R^*_{тm\upsilon}$ от скорости обдува воздухом υ при $\theta_к$ =10 К и T_0=30°С. Конструкции конденсаторов: *а* — пропитанные с выпущенной фольгой в металлическом (*1*) и пластмассовом (*2*) корпусах и скрытой фольгой в металлическом корпусе (*3*); *б*— с металлизированными обкладками пропитанные (*1*) и непропитанные (*2*); *в* — с оксидным диэлектриком

на рис. 4.4.8, *а—в*. Здесь $R_{тm}$ — полное максимальное тепловое сопротивление конденсатора при естественном охлаждении; $R_{тm\upsilon}$ — полное максимальное тепловое сопротивление при обдуве конденсатора потоком воздуха со скоростью υ. По ним можно оценить эффективность применения

принудительного охлаждения для конденсаторов разнообразных конструкций.

Экспериментальные зависимости полных средних $R_{т.с}$ и наружных $R_{т.н}$ тепловых сопротивлений и их отношение $R_{т.н}/R_{т.с}$ для конденсаторов типа К50-24 от площади боковой поверхности и скорости обдува конденсаторов потоком воздуха показаны на рис. 4.4.9—4.4.11.

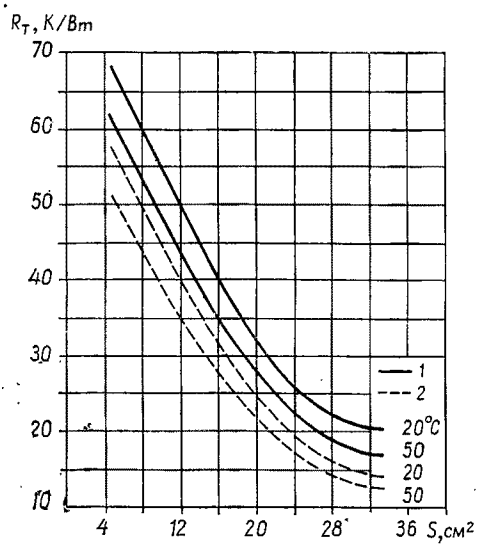


Рис. 4.4.9. Зависимость тепловых сопротивлений конденсаторов К50-24 от площади боковой поверхности для различных превышений температуры корпуса относительно окружающей среды: *1*—полное среднее тепловое сопротивление $R_{т.с}$; *2* — наружное тепловое сопротивление $R_{т.н}$

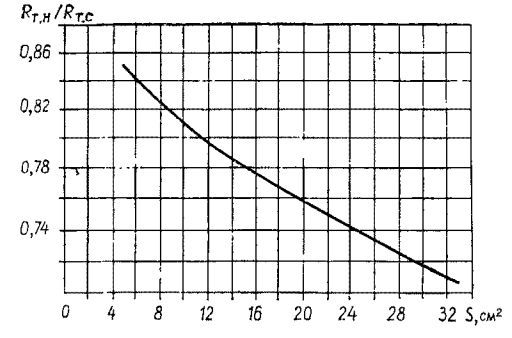


Рис. 4.4.10. Зависимость отношения наружного теплового сопротивления к полному среднему тепловому сопротивлению от боковой поверхности для конденсаторов К50-24

Для конденсаторов этого типа $R_{т.н}/R_{т.с} = 0{,}71 - 0{,}85$ и поэтому применение принудительного охлаждения позволяет снизить значение $R_{т.с}$ в 3—5 раз и тем самым увеличить электрическую нагрузку по напряжению в 1,7—2,2 раза по сравнению с естественными условиями охлаждения, если электрическая нагрузка в данном режиме ограничивается уровнем тепловыделения в конденсаторе.

Водяное охлаждение конденсаторов значительно эффективнее принудительного воздушного. Его использование позволяет увеличить удельные параметры конденсаторов в 10—20 раз по сравнению с естественным воздушным охлаждением или во столько же раз снизить полное тепловое сопротивление.

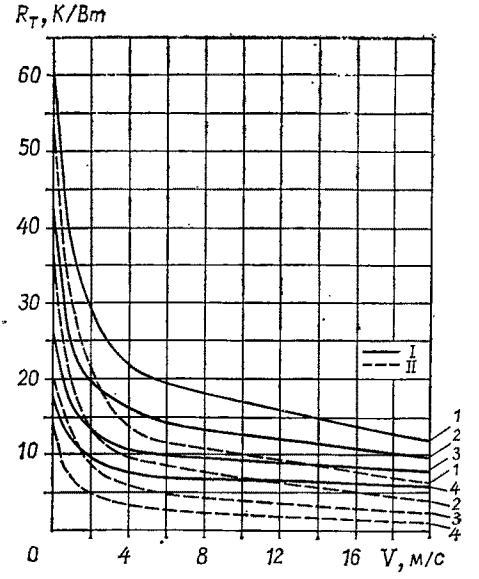


Рис. 4.4.11. Зависимость тепловых сопротивлений конденсаторов К50-24 от интенсивности охлаждения (скорости обдува) для различных номиналов. $C_н$, мкФ: *1*—220; *2*—470; *3*—100; *4*—220; $U_н$, В: *1*—6,3; *2*—25; *3*, *4*—160; *I* — полное среднее тепловое сопротивление $R_{т.с}$; *II* — наружное тепловое сопротивление $R_{т.н}$

Тепловая постоянная времени конденсаторов

Тепловая постоянная времени конденсатора $\tau_т$ определяется как время, в течение которого превышение температуры корпуса $\vartheta_к$ достигает величины 0,632 $\Theta_к$ установившегося значения.

Тепловую постоянную $\tau_т$ можно найти также расчетным путем из соотношения

$$\tau_т = R_т C_{т.у} M, \qquad (4.4.11)$$

где M — масса конденсатора. Величина $C_{т.у} M$ определяется как сумма произведений из теплоемкостей всех материалов, использованных в конденсаторе (включая корпус), на соответствующие значения масс:

$$C_{т.у} M = \sum_{i=1}^{n} C_{т.у i} m_i. \qquad (4.4.12)$$

Таблица 4.4.5

Габариты конденсатора, мм	Тепловая постоянная времени $\tau_т$, ч
175×110×165	1,3—1,4
380×120×185 (нулевой)	1,9—2,0
380×120×325 (первый)	2,3—2,5
380×120×640 (второй)	3,3—3,5

Тепловые постоянные времени некоторых типов конденсаторов приведены в приложении 3; ориентировочные значения тепловых постоянных времени для силовых конденсаторов — в табл. 4.4.5.

§ 4.5. Параметры и характеристики критического теплового режима

В конденсаторах, даже при неизменных параметрах электрической нагрузки, мощность тепловыделения зависит от пространственного распределения внутренней температуры при условии, что $C(T)$, $\mathrm{tg}\delta(T)$ и $R_{из}(T)$ (см. § 4.1 и 4.2).

Если при работе температуры мощность тепловыделения превышает теплоотводящую способность конденсатора, то возникает режим его тепловой неустойчивости — лавинообразное нарастание температуры без установления стационарного теплового режима, в результате которого происходит термическое разрушение диэлектрика (тепловой пробой), либо его электротепловой пробой — электрический пробой диэлектрика вследствие снижения его электрической прочности из-за высокой температуры.

Тепловая неустойчивость конденсатора может возникнуть в результате постепенного или скачкообразного роста мощности тепловыделения из-за изменения параметров воздействующего напряжения, тангенса угла потерь, снижения сопротивления изоляции, ухудшения условий охлаждения (увеличения температуры охлаждающей среды, роста тепловых сопротивлений конденсаторов, отказов в системе принудительного охлаждения и т. д.).

Работоспособность конденсаторов в длительном режиме будет обеспечена, если их тепловой режим устойчив, т. е. если условия их охлаждения и нагрузка таковы, что существует стационарный режим с определенным запасом по тепловой устойчивости. На рис. 4.5.1 это состояние показано точкой A_1 (точка пересечения прямой, проведенной под углом $\varphi = \mathrm{arctg}\,\frac{m_p}{m_1 R_{т.с}}$, где $m_т$ и m_p — масштабы по температуре и мощности), к оси T через точку O_1 согласно уравнению $P = \frac{T - T_0}{R_{т.с}}$ с кривой *1*.

При увеличении мощности тепловыделения в конденсаторе, например за счет роста напряжения ($U_2 > U_1$), зависимость $P(T)$ пойдет выше (кривая *2*, рис. 4.5.1), в результате устанавливается новое стационарное состояние (точка A_2) с меньшим запасом по тепловой устойчивости. Наконец, при определенном значении напряжения $U_3 > U_2$, которому соответствует кривая *3*, возникает состояние критического теплового режима — положение неустойчивого теплового равновесия (точка A_3, рис. 4.5.1); при нем малейшее увеличение тепловыделения в конденсаторе приведет к тепловой неустойчивости (кривая *4*, соответствующая $U_4 > U_3$, не пересекается и не касается прямой $P = \frac{T - T_0}{R_{т.с}}$).

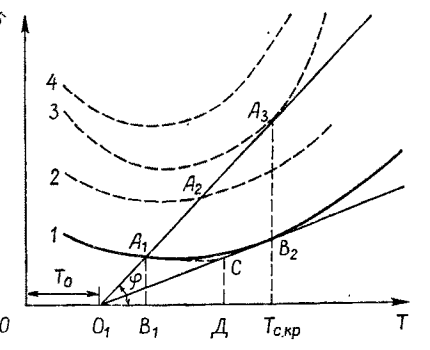


Рис. 4.5.1. Определение параметров критического теплового режима конденсатора, имеющего один температурный экстремум мощности тепловыделения

Очевидно, что параметры критического теплового режима (критическая мощность тепловыделения, средняя температура в конденсаторе) определяются видом зависимости $P(T)$, значением среднего теплового сопротивления конденсатора $R_{т.с}$ и температурой охлаждающей среды (T_0).

Параметры критического теплового режима можно найти графоаналитическим путем. Из точки O_1 проводится касательная к кривой *1*, которая строится, например, для номинального режима. Проекция точки B_2 на ось T (см. рис. 4.5.1) непосредственно дает значение средней критической температуры ($T_{с.кр}$). Затем из точки A_1 проводится прямая, параллельная оси T, до пересечения с этой касательной (точка C, рис. 4.5.1). Тогда мощность тепловыделения в критическом тепловом режиме $P_{кр} = P' \frac{O_1 D}{O_1 B_1}$, где $P' = A_1 B_1 m_p$ (m_p — масштаб мощности) — мощность тепловыделения в конденсаторе, рассчитанная по параметрам номинального режима, при $\mathrm{tg}\delta$, соответствующего $T_с = T_0 + P_1 R_{т.с}$ (см. отрезок $O—B_1$, рис. 4.5.1).

Для некоторых конструкций конденсаторов температурная зависимость мощности тепловыделения может быть аппроксимирована простыми выражениями, позволяющими при ряде упрощающих допущений найти аналитические выражения для параметров критического теплового режима.

Таблица 4.5.1

Тип конденсатора	Частота f, Гц	Коэффициент a, $К^{-2}$	Температура T_1, °С
МБГЧ	10^2	$1{,}2\cdot10^{-3}$	70
К75-10	10^2	$1{,}6\cdot10^{-3}$	70
ЛСМ	10^2	$0{,}3\cdot10^{-3}$	60
К73П-2	10^3	$a'=3{,}5\cdot10^{-3}$; $a''=2{,}5\cdot10^{-3}$	$T_1'=75$; $T_1''=165$
К73-11	10^3	$a'=3{,}6\cdot10^{-3}$; $a''=2{,}7\cdot10^{-3}$	$T_1'=70$; $T_1''=165$
К73-26	10^3	$a'=2{,}0\cdot10^{-3}$; $a''=1{,}5\cdot10^{-3}$	$T_1'=70$; $T_1''=165$

Так, полагая, что тепловые сопротивления конденсатора не зависят от мощности тепловыделения в нем, и считая, что мощность тепловыделения $P=P_0[1+a(T_c-T_1)^2]$, совместное решение этого уравнения и $P=\dfrac{T-T_c}{R_{т.с}}$, учитывая единственность решения в критическом режиме, имеет вид

$$P_{окр}=\frac{T_1-T_0+\sqrt{(T_1-T_0)^2+\dfrac{1}{a}}}{2R_{т.с}}; \quad (4.5.1)$$

$$T_{с.кр}=T_1+\frac{1}{2aR_{т.с}P_{окр}}; \quad (4.5.2)$$

$$P_{кр}=\frac{T_{с.кр}-T_c}{R_{т.с}}; \quad (4.5.3)$$

$$T_{ткр}=T_0+P_{кр}R_{тт}, \quad (4.5.4)$$

где $P_{кр}$, $T_{с.кр}$ и $T_{ткр}$ — мощность тепловыделения, средняя по объему конденсатора и максимальная внутренняя температура в критическом тепловом режиме; T_0 — температура окружающей среды; $R_{т.с}$ и $R_{тт}$ — соответственно среднее и максимальное полные тепловые сопротивления конденсатора (см. § 4.4.)

В табл. 4.5.1 приведены ориентировочные значения коэффициентов a и T_1 некоторых типов конденсаторов, найденные по экспериментальным зависимостям $\mathrm{tg}\delta(T)$.

В рассмотренные выше соотношения подставляются значения T_1, a, $R_{т.с}$ и другие для конкретного конденсатора, если определяются его параметры критического теплового режима и значения этих величин для совокупности конденсаторов (т. е. с учетом разбросов индивидуальных параметров и характеристик конденсаторов (см. § 4.1)), если оцениваются параметры критического теплового сопротивления для конденсаторов данного типа и номинальных параметров.

Пример 1. Необходимо определить параметры критического теплового режима одиночно расположенного конденсатора МБГЧ-250В-10 мкФ при естественном воздушном охлаждении и $T_{0\,max}=20$°С.

Согласно данным (приложение 4, табл. 4.7) принимаем, что $R_{т.вт}=4{,}1$ К/Вт и $R_{т.в.с}=2{,}3$ К/Вт. Для площади поверхности конденсатора $S_0=135$ см^2 при $\Theta_к=30$ К $R_{т.н}=5{,}2$ К/Вт (см. рис. 4.4.3). Значения $R_{тт}$ и $R_{т.с}$, найденные согласно (4.4.5), равны: $R_{тт}=9{,}3$ К/Вт и $R_{т.с}=7{,}5$ К/Вт.

Используя данные табл. 4.5.1, по формулам (4.5.1)—(4.5.4) получаем

$$P_{0кр}=\frac{70-20+\sqrt{50^2+\dfrac{1}{1{,}2\cdot10^{-3}}}}{2\cdot7{,}5}=7{,}15 \text{ Вт};$$

$$T_{с.кр}=70+\frac{1}{2\cdot1{,}2\cdot10^{-3}\cdot7{,}5\cdot7{,}15}=77{,}8°С;$$

$$P_{кр}=\frac{77{,}8-20}{7{,}8}=7{,}4 \text{ Вт};$$

$$T_{ткр}=20+7{,}4\cdot9{,}3=89°С.$$

Температура корпуса $T_к=T_0+P_{кр}R_{т.н}=20+7{,}4\cdot5{,}2=59$°С.

Так как превышение температуры корпуса ($\Theta_к=59-20=39$ К) незначительно отличается от принятого значения при определении $R_{т.н}$, параметры критического теплового режима не уточняем.

В лавсановых конденсаторах с двумя температурными минимумами зависимости мощности тепловыделения имеют место режимы критического тепловыделения, после которых возникают ограниченная (кривая 1) и неограниченная (кривая 2) тепловые нестабильности (рис. 4.5.2). Параметры критических тепловых режимов определяются по формулам (4.5.1)—(4.5.4) для $T_1=T_1'$ и $T_1=T_1''$.

Поскольку тепловыделение в таких конденсаторах по достижении $T=120$—125°С начинает уменьшаться, то при превышении мощности $P_{кр}'$, найденной по (4.5.2), при $T_1=T_1'$ и $a=a'$ (точка B на рис. 4.5.2) возникает ограниченная тепловая нестабильность, проявляющаяся в том, что температура в конденсаторе при неизменном напряжении нарастает до установления стабильного состояния, соответствующего точке пересечения спадающей ветви зави-

симости $P(T)$ и прямой $P=\dfrac{T-T_0}{R_{т.с}}$ (см. точку C, рис. 4.5.2).

В этом режиме обеспечивается тепловая устойчивость конденсатора, так как тепловыделение в нем ниже, чем его теплоотводящая способность. Однако длительная (тысячи часов и более) работа конденсатора в этом режиме недопустима из-за интенсивного термического старения металлизированных обкладок и диэлектрика.

Анализ показывает, что возникновение ограниченной тепловой нестабильности конденсаторов с лавсановым диэлектриком зависит от температуры окружающей среды (T_0). Приближенно оценку возникновения этого вида тепловой нестабильности можно осуществить, сопоставив значение $T'_{с.кр}$, найденное по (4.5.2) при $T_1=T'_1$, со значением температуры в точке перегиба кривой $P(T)$ (см. значение $T_п$, рис. 4.5.2). Для лавсановых конденсаторов $T_п\approx 100-110$°С. Если $T'_{с.кр}\geqslant T_п$, то ограниченной тепловой нестабильности не наблюдается. Она возникает при $T'_{с.кр}<T_п$. Ввиду заметной зависимости полного среднего теплового сопротивления таких конденсаторов как от температуры охлаждающей среды, так и от удельной мощности тепловыделения (см § 5.4 и приложение 4), определение параметров критического теплового режима, соответствующих ограниченной и неограниченной тепловой нестабильности, рассмотренным выше способом является приближенным.

Другая погрешность расчетов по приведенным выше формулам обусловлена допущением равномерности распределения температуры по объему активного диэлектрика конденсатора.

Так как это в первом приближении справедливо только для конденсаторов с фольговыми обкладками, то погрешность расчетов параметров критического теплового режима для них меньше, чем для конденсаторов с металлизированными обкладками.

В целом погрешность определения параметров критического теплового режима конденсаторов с лавсановым диэлектриком в ряде случаев может достигать десятков процентов. Уточнение этих параметров можно осуществить с помощью ЭВМ или экспериментальным путем, используя расчетные данные, получаемые из (4.5.2) и (4.5.3) в качестве начальных приближений.

С помощью ЭВМ можно также определить, достигает ли конденсатор критического теплового режима при изменяющейся во времени мощности тепловыделения, т. е. в переходных режимах.

В связи с большим числом применений конденсаторов при несинусоидальной форме напряжений для практики представляет значительный интерес определение параметров критического теплового режима в этих случаях.

Так как зависимость $\mathrm{tg}\delta$ конденсаторов от температуры на разных частотах различна (см. § 4.1), то для использования при несинусоидальном напряжении рассмотренных выше подходов необходимо характеристику $P(T)$ строить с учетом вклада потерь от отдельных гармонических составляющих [В.12], т. е.

$$P(T)=P_1(T)\sum_{k=1}^{\infty}\left(\frac{U_k}{U_1}\right)^2\times$$

$$\times\frac{C_к(T)\,\mathrm{tg}\delta_к(T)}{C_1(T)\,\mathrm{tg}\delta_1(T)},$$

где $P_1(T)$ — температурная зависимость мощности тепловыделения в конденсаторе на частоте первой гармоники; U_1 и $U_к$ —

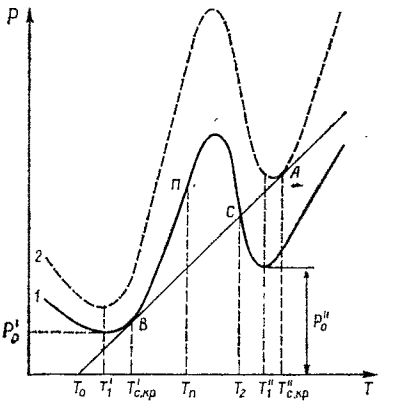


Рис. 4.5.2. Оценка параметров критического теплового режима конденсатора с диэлектриком из лавсана

действующие значения напряжения первой и высших гармоник; $C_1(T)$, $\mathrm{tg}\delta_1(T)$ и $C_к(T)$, $\mathrm{tg}\delta_к(T)$ — температурные зависимости емкости и $\mathrm{tg}\delta$ конденсатора на частоте первой и высших гармоник напряжения.

Для типовых форм несинусоидального напряжения (§ 5.1), учитывая приближенный характер расчетов параметров критического теплового режима, можно использовать характеристику $P(T)$, полученную при средней частоте $f_с$ (см. табл. 5.3.2, § 5.3).

Таким образом, для определения параметров критического теплового режима конденсаторов необходимо знать: их тепловые сопротивления, зависимости емкости и $\mathrm{tg}\delta$ от температуры, температуру охлаждающей среды.

По характеристикам $C(T)$ и $\mathrm{tg}\delta(T)$, полученным экспериментально при отсутствии электрической нагрузки на конденсаторах, строится зависимость $P(T)$, которая используется для выполнения расчетов температурного поля, тепловых сопротивлений конденсаторов на ЭВМ. По этим же характеристикам находятся значения a и T_1, необходимые для выполнения расчетов по формулам (4.5.1)—(4.5.4).

Так как зависимости $P(T)$ для конденсаторов даже одного и того же типа и номинальных параметров имеют случайный характер, то параметры критического теп-

лового режима для каждого конкретного конденсатора будут индивидуальны.

Используя изложенные выше подходы, можно построить характеристики критического теплового режима, например, зависимость критической мощности тепловыделения и температуры в конденсаторе от температуры охлаждающей среды (рис. 4.5.3).

В свою очередь, зная мощность тепловыделения в критическом тепловом режиме и используя формулы § 7.2, можно найти параметры воздействующего напряжения, приводящие к этому режиму.

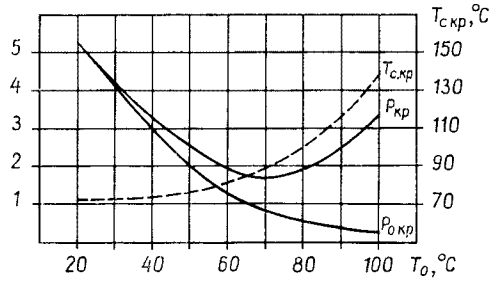


Рис. 4.5.3. Зависимость $P_{0\,кр}$, $T_{с.кр}$ и $P_{кр}$ от температуры T_0 для конденсатора, имеющего $T_1=75$°С, $a=3{,}5\times10^{3}$К$^{-2}$ и $R_{т.с}=10$ К/Вт

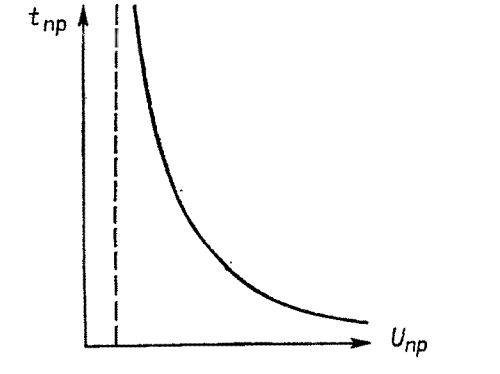


Рис. 4.5.4. Зависимость времени теплового пробоя от напряжения

Пример 2. Необходимо определить значение симметричного трапецеидального напряжения с линейными фронтами одинаковой длительности (см. рис. 5.1.2, *б*), приводящего к возникновению ограниченной и неограниченной тепловой нестабильности конденсатора К73П-2-400В-4 мкФ, при следующих условиях: $T_0=70$°С, $f_п=400$ Гц, $t_ф=10^{-4}$ с. Средняя частота, согласно табл. 5.3.2, для напряжения указанного вида $f_с=\dfrac{400}{2\cdot10^{-4}}=1420$ Гц. Так как средняя частота достаточно близка к 10^3 Гц, то можно воспользоваться данными табл. 4.5.1 и приложения 4. По формулам определяем

$$P_{окр}=\frac{1}{2\cdot23}\left[(75-70)+\sqrt{5^2+\frac{1}{3{,}5\cdot10^{-3}}}\right]=0{,}49\ \text{Вт};$$

$$T_{с.кр}=\frac{1}{2\cdot3{,}5\cdot10^{-3}\cdot23\cdot0{,}49}=87{,}7\ °\text{С};$$

$$P'_{кр}=\frac{87{,}7-70}{23}=0{,}78\ \text{Вт},$$

где $R_{т.с}=R_{в.с}+R_{т.н}=23$ К/Вт, согласно данным § 4.4 и приложения 4. Используя соответствующую формулу табл. 7.4.1, находим полный размах трапецеидального напряжения, приводящего к возникновению ограниченной тепловой нестабильности конденсатора К73П-2-400В-4,0 мкФ:

$$U_{п.п}=\sqrt{0{,}78/1{,}5\cdot4\cdot10^{-6}\cdot400\cdot4}\times$$

$$\times\sqrt{10^{-3}\lg\ 1{,}4/400\cdot10^{-1}}=218\text{В}.$$

Значение $\operatorname{tg}\delta=4\cdot10^{-3}$ здесь взято согласно рис. 1 приложения 4 при $T=T_{с.кр}=87{,}7$°С.

Параметры критического теплового режима, приводящего к неограниченной тепловой нестабильности, находим также по формулам (4.5.1)—(4.5.3), подставляя значения $a''=2{,}5\cdot10^{-3}$ и $T_1=T_1''=165$°С.

Так как внутреннее тепловое сопротивление конденсатора К73П-2 сильно зависит от мощности тепловыделения (см. табл. 4.9, приложение 4), то расчет начнем с некоторого значения, например с $P\approx1$ Вт. Наружное тепловое сопротивление конденсатора при $S_0=120$ см^2 определяем по рис. 4.4.3 при $\Theta_к=5$ К $R_{т.н}=7{,}2$ К/Вт. Значение $q_0=\dfrac{P}{V}=\dfrac{1\cdot10^{-6}}{0{,}75\cdot60\cdot10^{-6}}\approx$ $\approx0{,}022$ МВт/м^3. Согласно табл. 4.9 приложения 4 значение $R_{т.в.с}$ для такого q_0 при $T_к=70$°С приблизительно равно 6,5 К/Вт. Полное среднее тепловое сопротивление $R_{т.с}=R_{т.н}+R_{т.в.с}=13{,}7$ К/Вт. Значения

$$P_{окр}=\frac{1}{2\cdot13{,}7}\left[(165-70)+\sqrt{92^2+\frac{1}{0{,}25\cdot10^{-3}}}\right]\approx6{,}8\ \text{Вт};$$

$$T_{с.кр}=165+\frac{1}{2\cdot2{,}5\cdot10^{-3}\cdot6{,}8\cdot13{,}7}\approx167\ °\text{С};$$

$$P''_{кр}=\frac{167-70}{13{,}7}\approx7\ \text{Вт}.$$

Так как полученное значение $P_{кр}$ значительно больше принятого вначале, что,

возможно, приведет к снижению $R_{т.с}$, уточним $R_{т.с}$ и $R_{кр}$.

Превышение температуры корпуса при $P \approx 7$ Вт и $R_{т.п} \approx (5—6)$ К/Вт составит $\Theta_к = 7 \cdot (5—6) = 35—42$ К, а значение $R_{т.п}$ в критическом тепловом режиме равно примерно 5,5 К/Вт (см. рис. 4.4.3 при $S_о = 120$ см^2).

Удельное тепловыделение $q_о = 0{,}155$ МВт/м^3. $R_{т.в.с}$ для такого значения согласно табл. 4.9 приложения 4 для $T_к = 85$°С будет не более 8,5 К/Вт. Полное среднее тепловое сопротивление составит $R_{т.с} = 5{,}5 + 8{,}5 = 14$ К/Вт.

Поскольку значение $R_{т.с}$ незначительно отличается от полученного ранее (что связано с характером зависимостей $R_{т.вт}(q_о)$, показанных на рис. 3 приложения 4), расчет $P_{кр}$ считаем законченным. Значение полного размаха напряжения в критическом тепловом режиме находим по формуле из табл. 7.4.1: $U_{п.п} = 534$ В. При его расчете $\mathrm{tg}\delta = 6{,}0 \cdot 10^{-3}$ (в соответствии с рис. 1 приложения 4) $T_{с.кр} = 167$°С.

Так как температурно-частотные зависимости фактора потерь $C \times \mathrm{tg}\delta$ конденсаторов вследствие старения изменяются во времени (см. § 4.1, глава 4), то с течением времени изменяются параметры и характеристики критического теплового режима. Обычно они снижаются, что учитывается при определении предельно допустимых режимов их работы (см. седьмую главу).

Нестабильность теплового режима конденсаторов может возникнуть не только в непрерывных простых режимах теплового нагружения, но и в других режимах нагружения (§ 5.1). Критическая мощность тепловыделения тогда рассчитывается на ЭВМ согласно методике (см. § 5.4) и программе, приведенной в приложении 5.

Так как конденсатор обладает тепловой инерцией, то тепловая неустойчивость, а затем и тепловой пробой конденсатора возникают не сразу, а спустя некоторые промежутки времени от начала их воздействия на конденсатор.

Время теплового пробоя ($t_{пр}$) сильно зависит от параметров воздействующего на конденсатор напряжения (рис. 4.5.4).

§ 4.6. Электрическая прочность конденсаторов

Кратковременная электрическая прочность конденсаторов с бумажным и пленочным диэлектриком во многом определяется конфигурацией электрического поля электродов (обкладок). На краю обкладки создается сильно неравномерное электрическое поле, сохраняющееся на расстояниях от края приблизительно на порядок, превышающий толщину диэлектрика. При бо́льших расстояниях от края к середине обкладок поле плоскопараллельно и напряженности его в каждом из слоев диэлектрика постоянны. В большинстве случаев кратковременную прочность и другие характеристики изоляции относят к средней расчетной напряженности:

$$E = \frac{U_с}{d}, \qquad (4.6.1)$$

где $U_с$ — приложенное к секции напряжение; d — расчетная толщина изоляции секции, равная номинальной толщине ее твердой фазы.

В области плоскопараллельного поля силовые линии направлены перпендикулярно слоям бумаги или пленки. В области сильно неравномерного поля возникают значительные составляющие напряженности, направленные вдоль слоев твердой фазы. Электрическая прочность вдоль слоев в 10—20 раз ниже ее значения поперек слоев. Поэтому наличие продольных составляющих напряженности облегчает развитие местных частичных разрядов (ЧР) вдоль слоев (см. § 2.4).

При остром крае обкладки напряженность E_r во внешней области на расстоянии r от края электрода при $r < 0{,}1d$ можно оценить по формуле [В.6]:

$$E_r = \frac{U_с}{\sqrt{\pi d_с r}}. \qquad (4.6.2)$$

Условием возникновения ЧР у края обкладки следует считать равенство напряженности поля на некотором расстоянии $r_о$ от края обкладки значению $E_о$, достаточному для развития разряда. Если $U_{нач}$ — напряжение возникновения начальных ЧР, то

$$U_{нач} = E_о \sqrt{\pi r_о d} = A d^{0{,}5}, \qquad (4.6.3)$$

где A — постоянная. Средняя напряженность возникновения начальных ЧР равна

$$E_{нач} = \frac{U_{нач}}{d} = A d^{-0{,}5} \qquad (4.6.4)$$

и изменяется обратно пропорционально $\sqrt{d}$.

В области плоскопараллельного поля средняя напряженность поля в изоляции может отличаться от значения E, рассчитанного по формуле (4.6.1), в силу того, что для реальной секции $d_с = d/k$, где k — коэффициент запрессовки изоляции. При этом средняя напряженность электрического поля E' с учетом коэффициента запрессовки равна:

$$E' = \frac{U_с k}{d}. \qquad (4.6.5)$$

Для трехкомпонентной системы изоляции, состоящей из последовательно расположенных слоев бумаги, пленки и пропитывающего состава, напряженности при переменном напряжении в компонентах (клетчатке $E_к$, пленке $E_п$ и пропитывающей жидкости $E_ж$) связаны со средней напряженностью поля E следующими соотношениями [В.6]:

$$E_к = \frac{d}{k \varepsilon_к \sigma_\varepsilon} E'; \qquad (4.6.6)$$

$$E_{\text{п}} = \frac{d}{k\varepsilon_{\text{п}}\sigma_{\varepsilon}} E'; \qquad (4.6.7)$$

$$E_{\text{ж}} = \frac{d}{k\varepsilon_{\text{ж}}\sigma_{\varepsilon}} E', \qquad (4.6.8)$$

где $\sigma_{\varepsilon} = d_{\text{к}}/\varepsilon_{\text{к}} + d_{\text{п}}/\varepsilon_{\text{п}} + d_{\text{ж}}/\varepsilon_{\text{ж}}$; $\varepsilon_{\text{к}}$, $\varepsilon_{\text{п}}$, $\varepsilon_{\text{ж}}$ и $d_{\text{к}}$, $d_{\text{п}}$, $d_{\text{ж}}$ — соответственно диэлектрические проницаемости и толщины слоев клетчатки, пленки и пропитывающей жидкости. При $\varepsilon_{\text{ж}} < \varepsilon_{\text{к}}$ в бумажно-пропитанном диэлектрике при переменном напряжении наибольшая напряженность возникает в пропитывающей жидкости. В этом случае с ростом плотности бумаги напряженность в жидком диэлектрике увеличивается. Для неполярной пленки $\varepsilon_{\text{п}} < \varepsilon_{\text{к}}$ и $\varepsilon_{\text{п}} < \varepsilon_{\text{ж}}$ и поэтому наибольшая напряженность появляется в слоях пленочного диэлектрика.

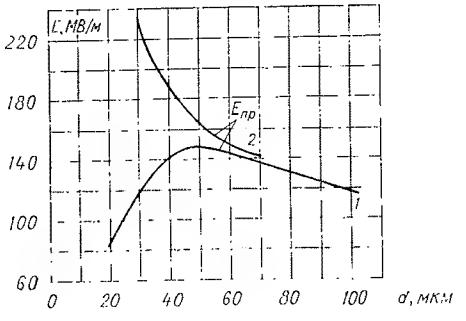


Рис. 4.6.1. Зависимость пробивной напряженности электрического поля от толщины для бумажного (*1*) и бумажно-пленочного (*2*) диэлектриков (содержание пленки 50%) при напряжении промышленной частоты. Пропитка — трихлордифенил

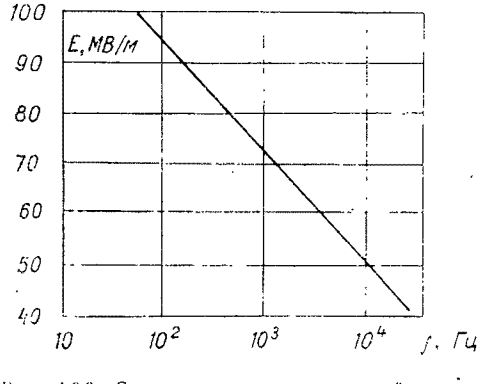


Рис. 4.6.2. Зависимость кратковременной электрической прочности бумажно-масляной изоляции от частоты

При постоянном напряжении напряженности поля в компонентах пропорциональны их удельным объемным сопротивлениям и соответственно равны:

$$E_{\text{к}} = \frac{\rho_{\text{к}} d}{k\sigma_{\rho}} E'; \qquad (4.6.9)$$

$$E_{\text{п}} = \frac{\rho_{\text{п}} d}{k\sigma_{\rho}} E'; \qquad (4.6.10)$$

$$E_{\text{ж}} = \frac{\rho_{\text{ж}} d}{k\sigma_{\rho}} E', \qquad (4.6.11)$$

где $\sigma_{\rho} = \rho_{\text{к}} d_{\text{к}} + \rho_{\text{п}} d_{\text{п}} + \rho_{\text{ж}} d_{\text{ж}}$; $\rho_{\text{к}}$, $\rho_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{ж}}$ — удельные объемные сопротивления клетчатки, пленки и пропиточной жидкости.

Так как $\rho_{\text{ж}} < \rho_{\text{к}}$ и $\rho_{\text{ж}} < \rho_{\text{п}}$, то при постоянном напряжении наименьшая напряженность поля возникает в прослойках жидкого диэлектрика. Обычно $\rho_{\text{п}} > \rho_{\text{к}}$, и поэтому наибольшая напряженность в бумажно-пленочной изоляции появляется в слоях пленки.

Кратковременная электрическая прочность определяется при быстром (в течение секунд или десятков секунд) подъеме напряжения или при импульсном напряжении и зависит главным образом от электрической прочности твердой фазы изоляции. Однако и свойства пропиточных жидкостей оказывают на нее определенное влияние. Пробивная напряженность вычисляется по формуле (4.6.1).

На рис. 4.6.1 приведены экспериментальные зависимости $E_{\text{пр}}$ от толщины изоляции. При определенной толщине изоляции $d_{\text{опт}}$ электрическая прочность $E_{\text{пр}}$ максимальна. Снижение $E_{\text{пр}}$ при $d > d_{\text{опт}}$ обусловлено ростом искажения поля на краю обкладок. При $d < d_{\text{опт}}$ снижение $E_{\text{пр}}$ обусловлено ростом влияния сквозных пор, токопроводящих включений и местных дефектов. Уменьшение толщины бумажного листа или пленки сдвигает $d_{\text{опт}}$ в сторону меньших значений d вследствие того, что доля включений или пор в общей толщине диэлектрика будет снижаться. У обычных конденсаторных бумаг с толщиной листа 10 мкм, пропитанных трихлордифенилом, максимум $E_{\text{пр}}$ наблюдается при $d = 40 - 60$ мкм. У пропитанного бумажного диэлектрика величина $E_{\text{пр}}$ имеет значительный разброс, причём среднеквадратичное отклонение σ возрастает с уменьшением толщины изоляции. Для $50 \leqslant d \leqslant 80$ мкм $\sigma = (0{,}07 \div 0{,}10)\, E_{\text{пр.ср}}$. При толщине, близкой к оптимальной, распределение пробивных напряжений подчиняется нормальному закону.

Пропитанная бумажная изоляция с бумагами, содержащими меньшее количество токопроводящих включений на единицу площади, при $d \leqslant 40$ мкм имеет значение $E_{\text{пр}}$, на 20—30% превышающее электрическую прочность изоляции с обычными бумагами. При $d > 40$ мкм этого не наблюдается. С повышением объемной массы бумаги $\gamma_{\text{б}}$ электрическая прочность изоляции увеличивается. У диэлектрика с использованием синтетической пленки с жидким наполнителем максимум $E_{\text{пр}}$ существенно возрастает и сдвигается в область малых толщин (см. рис. 4.6.1).

Характер зависимости $E_{\text{пр}} = f(d)$, аналогичный приведенному на рис. 4.6.1, сохраняется как для постоянного, так и для переменного напряжения; однако $E_{\text{пр}}$ при постоянном напряжении примерно вдвое

выше действующего значения $E_{пр}$ при переменном напряжении промышленной частоты. Объясняется это тем, что на переменном напряжении в предпробивной период появляются ЧР. Их интенсивность возрастает с увеличением напряжения, что приводит к частичному разрушению твердой фазы еще до наступления пробоя.

Уровень кратковременной электрической прочности при воздействии однократного униполярного импульсного напряжения будет незначительно превышать прочность при постоянном напряжении. Повышение частоты следования импульсов снижает $E_{пр}$ вследствие разрушения диэлектрика ЧР.

Для хорошо высушенной бумажной пропитанной изоляции и большинства видов пленочной изоляции кратковременная электрическая прочность конденсаторов слабо зависит от температуры в диапазоне от -60 до $+80$°С. Для некоторых конденсаторов из пленок, имеющих низкую температуру размягчения (полистирол, полиэтилен), электрическая прочность начинает существенно снижаться с повышением температуры выше 50—60°С и при 80°С снижается примерно вдвое.

Кратковременная электрическая прочность бумажно-масляной изоляции уменьшается с ростом частоты (рис. 4.6.2), что можно объяснить влиянием ЧР в предпробивной период, интенсивность которых при повышении частоты увеличивается.

При воздействии несинусоидального напряжения на конденсатор необходимо учитывать, что кратковременная электрическая прочность определяется в основном амплитудным значением напряжения.

Электрическая прочность бумажно-масляного диэлектрика при пульсирующем напряжении $E_{пр.пул}$, содержащем постоянную (E_0) и переменную ($E_\sim$) составляющие частотой 50 Гц, зависит от их соотношения $k=E_0/E_\sim$ и изменяется от значения $E_{пр}$ при переменном напряжении ($k=0$) до значения $E_{пр}$ при постоянном напряжении ($k=\infty$). Эта зависимость аналитически хорошо аппроксимируется формулой [В.6]:

$$E_{пр.пул} = E_{пр\sim} + (E_{про} - E_{пр\sim})\left(1 - e^{-k/B}\right), \quad (4.6.12)$$

где $B=4$ — экспериментально установленная постоянная.

Рост избыточного давления пропитывающего состава позволяет повысить кратковременную электрическую прочность изоляции конденсаторов. Например, для бумажно-масляной изоляции повышение давления до $(5—6)\cdot10^5$ Па приводит к увеличению кратковременной прочности на 20—25%.

Кратковременная прочность значительно снижается с ростом площади обкладок. При этом необходимо учитывать площадь обкладок всех секций конденсатора, так как с увеличением площади обкладок возрастает вероятность совпадения слабых мест в различных слоях изоляции секций. Таким образом, конденсаторы аналогичной конструкции с большей емкостью или большей энергией обладают меньшей электрической прочностью. Вероятность пробоя P при напряжении не более U конденсатора с площадью обкладок S связана с вероятностью пробоя P_m при напряжении не более U образца с площадью mS соотношением

$$P_m = 1-(1-P)^m. \quad (4.6.13)$$

Обозначим $U_{ср}$ — среднее пробивное напряжение конденсаторов с площадью обкладок S; $U_{mср}$ — то же для конденсаторов с площадью обкладок $S_m=mS$; σ и σ_m — соответственно среднеквадратичные отклонения. Эти параметры связаны соотношениями

$$U_{ср}-U_{mср}=a\sigma; \quad (4.6.14)$$

$$\sigma_m = b\sigma, \quad (4.6.15)$$

где a и b — функции m. Функции распределения пробивных напряжений конденсаторов обычно близки к нормальному закону. В этом случае значения коэффициентов a и b могут быть определены из табл. 4.6.1.

Таблица 4.6.1

m	a	b
1	0	1
10^1	1,54	0,59
10^2	2,50	0,43
10^3	3,25	0,35
10^4	3,85	0,30

Кратковременная электрическая прочность ограничивает значения испытательных напряжений $U_{исп}$ (испытательных напряженностей $E_{исп}$) в большинстве случаев для конденсаторов, работающих при постоянном и импульсном напряжениях. Для бумажных конденсаторов обычно испытательная напряженность не должна превышать 100 МВ/м. Только для некоторых типов импульсных конденсаторов с пленочной и пленочно-бумажной изоляциями испытательная напряженность доходит до 200 МВ/м.

Для конденсаторов постоянного напряжения обычно

$$U_{исп}=2U_{раб};\ E_{исп}=2E_{раб}, \quad (4.6.16)$$

где $U_{раб}$ и $E_{раб}$ — соответственно номинальное рабочее напряжение и рабочая напряженность.

Для импульсных конденсаторов, работающих в режиме однократных импульсов,

$$U_{исп}=(1{,}5\div1{,}2)U_{раб};$$

$$E_{исп}=(1{,}5\div1{,}2)E_{раб}. \quad (4.6.17)$$

Для конденсаторов промышленной и повышенной частоты, а также для импульсных, работающих при большой частоте повторения импульсов, значение испыта-

тельной напряженности ограничивается в основном характеристиками ЧР. В этом случае для конденсаторов промышленной частоты при испытании напряжением 50 Гц

$$U_{исп}=2{,}15U_{раб};\ E_{исп}=2{,}15E_{раб}. \quad (4.6.18)$$

Кратковременная электрическая прочность лимитирует значения испытательных напряжений (напряженностей) для конденсаторов промышленной и повышенной частот с комбинированным бумажно-пленочным и пленочным диэлектриками, так как у этих конденсаторов повышенная рабочая напряженность в пленочном диэлектрике.

Кратковременная электрическая прочность может ограничивать значение испытательных напряжений (напряженностей) при испытании конденсаторов промышленной или повышенной частоты постоянным напряжением. Например, для конденсаторов промышленной частоты при испытании постоянным напряжением

$$U_{исп}=4{,}3U_{раб} \text{ или } E_{исп}=4{,}3E_{раб}, \quad (4.6.19)$$

где $E_{раб}$ и $U_{раб}$ — соответственно действующие значения номинальных рабочих напряжений и напряженностей. Кратковременная электрическая прочность ограничивает также допустимую амплитуду кратковременных перенапряжений длительностью менее 0,1 с, которым конденсатор может подвергаться во время эксплуатации.

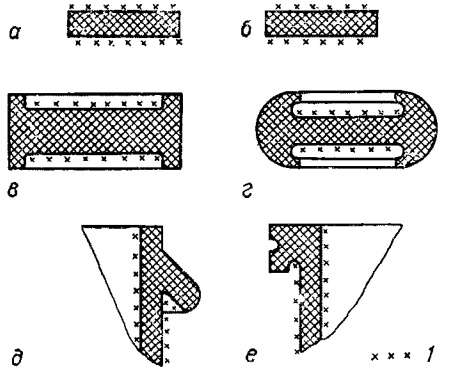


Рис. 4.6.3. Характерные конфигурации края электродов керамических конденсаторов с острыми (*а, б*) и закругленными (*в—е*) краями; *1*—электрод

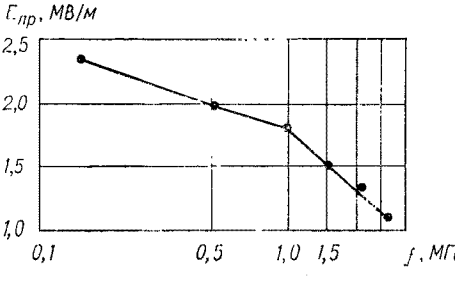


Рис. 4.6.4. Зависимость электрической прочности керамики Т-150 от частоты

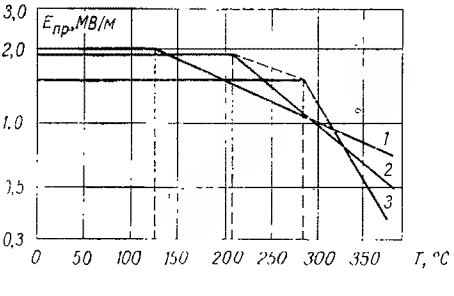


Рис. 4.6.5. Зависимость электрической прочности керамики Т-150 от температуры при различных частотах *f*, мГц: *1*—0,5; *2*—1,0; *3*—1,5

В некоторых типах низковольтных конденсаторов применяется изоляция секции, состоящая из малого количества (одного—трех) слоев бумаги или пленки. В этом случае возможно значительное снижение кратковременной прочности (см. рис. 4.6.1). Чтобы избежать влияния токопроводящих включений или дефектных мест на $E_{пр}$, при малых толщинах диэлектрика секций в некоторых конденсаторах используются плавкие вставки, включенные последовательно с секциями. При пробое одной из секций под действием энергии разряда других, включенных параллельно с пробитой, плавкая вставка сгорает и пробитая секция отключается. Это позволяет в подобных конденсаторах значительно увеличить допустимую рабочую напряженность.

Кратковременная электрическая прочность керамических конденсаторов. Радиокерамика, применяемая в электрических конденсаторах, имеет неоднородную структуру и состоит из кристаллической, стекловидной и газовой фаз. Газовая фаза распределена по объему керамики в виде пор, в которых при определенных напряжениях возникают ЧР. Из ионизированных пор может образоваться цепочка, приводящая к пробою керамики. Значения пробивной напряженности зависят от типа керамических материалов, толщины диэлектрика, конфигурации края обкладок, частоты приложенного напряжения [4.14, 4.15].

Для увеличения пробивной напряженности, напряжения ЧР и скользящих разрядов, а также повышения напряжения разряда по поверхности на краю электродов в керамических конденсаторах (особенно высоковольтных) используются специальные конфигурации края электродов, улучшающие электрическое поле в этой области. Некоторые из них приведены на рис. 4.6.3.

Кратковременная пробивная напряженность керамических конденсаторов значительно ниже, чем бумажных, бумажно-пленочных или пленочных, что объясняется указанной неоднородностью состава керамики.

Для высокочастотных керамических материалов ε_r выше 12 нижний предел пробивной напряженности $E_{пр}$ при напряжении 50 Гц составляет 5—8 МВ/м и несколько возрастает с уменьшением диэлект-

рической проницаемости материала, измеренной при 1 МГц.

Если $\varepsilon_r = 230-400$, то $E_{пр}$ при 50 Гц лежит не ниже 5 МВ/м; если $\varepsilon_r = 130-190$ — не ниже 6 МВ/м; если $\varepsilon_r = 12-100$ — не ниже 8 МВ/м.

Для низкочастотных керамических материалов, имеющих ε_r выше 900, пробивная напряженность меньше, чем для высокочастотной керамики: при ε_r, измеренной при 1 кГц, равном 900, нижний предел $E_{пр}$ при 50 Гц лежит не ниже 5 МВ/м; при $\varepsilon_r = 1400-2500$ — не ниже 4 МВ/м; при $\varepsilon_r = 3000-8000$ — не ниже 3 МВ/м.

Для высокочастотных керамических материалов с ε_r меньше 12 пробивная напряженность немного выше — около 20 — 25 МВ/м. Это позволяет использовать такие материалы для изготовления высоковольтных керамических конденсаторов.

Пробивная напряженность керамики уменьшается с ростом частоты приложенного напряжения. Например, для керамики Т-150 увеличение частоты от 100 кГц до 2 МГц приводит к снижению пробивной напряженности примерно в 2,5 раза (рис. 4.6.4).

Электрическая прочность керамики практически не зависит от температуры при ее повышении до 200°С. Дальнейший рост выше 200—250°С приводит к существенному снижению пробивной напряженности (рис. 4.6.5).

Работа конденсаторов с бумажным и пленочным диэлектриками при длительном воздействии рабочего напряжения

Электрическое старение изоляции. При длительном приложении напряжения снижается электрическая прочность изоляции конденсаторов. Ее снижение обусловлено в основном электрическим старением, основной причиной которого являются ЧР в изоляции.

При переменном напряжении в конденсаторах с пропиткой жидким диэлектриком ЧР на уровне 10^{-14} Кл и более вызывают разложение пропитывающего состава. Продукты разложения могут разрушать клетчатку, приводя к потере электрической прочности изоляции. Разрушение пропитывающего состава сказывается также на возрастании его проводимости, повышении $tg\delta$, что создает возможность развития теплового пробоя (см. § 4.5).

В конденсаторах, пропитанных нефтяным маслом и некоторыми хлордифенилами (например, пентахлордифенилом), электрическое старение заключается прежде всего в разложении пропитывающего состава под воздействием ЧР, сопровождающемся газовыделением и воскообразованием. В образовавшихся газовых включениях возникают ЧР значительно большей интенсивности (критические частичные разряды), приводящие к дальнейшему росту включений, снижению напряжения критических ЧР, разрушению клетчатки и пробою изоляции [В.7, 4.16].

Повышение газостойкости нефтяного масла приводит к заметному росту стойкости изоляции к воздействию ЧР и увеличению сроков ее службы.

В бумажных конденсаторах, пропитанных хлордифенилами, разрушение пропитывающего состава под воздействием ЧР происходит главным образом путем отрыва атомов водорода и хлора от молекул хлордифенилов. Из-за большого количества непредельных углеводородов в составе хлордифенилов газовыделения под воздействием ЧР обычно не происходит — атомы водорода и хлора либо присоединяются молекулами, либо соединяются, образуя хлористый водород. Кроме того, под воздействием ЧР из хлордифенилов выделяется углерод в виде сажи. Появление хлористого водорода вызывает разрушение твердого диэлектрика (бумаги, пленки). Влияние продуктов разложения на характеристики изоляции с пропиткой хлордифенилами проявляется прежде всего в повышении $tg\delta$ и проводимости изоляции, что может привести к нарушению тепловой устойчивости конденсатора в процессе эксплуатации. Необходимо отметить, что возникновение теплового пробоя в этом случае является следствием изменения характеристик изоляции в процессе эксплуатации под воздействием ЧР.

Между $tg\delta$ и концентрацией хлористого водорода и углерода в изоляции существует определенная связь. Концентрация продуктов разложения в свою очередь зависит от энергии ЧР, расходуемой в изоляции, поэтому $tg\delta$ зависит от энергии ЧР, выделившейся в изоляции за определенное время.

На постоянном напряжении наиболее сильно проявляется электрохимическое старение, при котором основную роль играют электролитические процессы. У положительно заряженных обкладок ионы могут образовывать активные вещества, вступающие в реакцию с металлом обкладки и диэлектриком. У отрицательно заряженных обкладок наличие металлических ионов приводит к образованию в толще диэлектрика проводящих дендритов, прорастание которых в свою очередь может вызвать снижение электрической прочности. Электролитические процессы, связанные с разложением углеводородных соединений, в присутствии остаточной влаги могут привести к образованию пузырьков газа и возникновению ЧР. В изоляции, пропитанной хлорированными жидкостями, в процессе электролиза образуются атомы хлора, водорода, что приводит к образованию хлористого водорода, разрушающего клетчатку и алюминиевые обкладки.

В результате процессов старения, основной причиной которых являются ЧР, снижается электрическая прочность изоляции, причем скорость протекания химических реакций, происходящих вследствие развития ЧР, возрастает с ростом температуры диэлектрика. В связи с этим пробивное напряжение конденсатора зависит от времени выдержки конденсатора под напряжением и температуры диэлектрика.

Температура диэлектрика зависит как от напряженности электрического поля (что определяет тепловыделение в единице

объема — см. § 2.3), так и от конструкции конденсатора и условий его эксплуатации (условий охлаждения, температуры окружающей среды, и т. д. (см. § 4.4, 5.5)).

Определение срока службы τ_c при напряжении выдержки U требует длительных экспериментов, проведение которых в лабораторных условиях крайне затруднительно. Поэтому при установлении указанной зависимости время выдержки редко превосходит сотни часов, причем эта зависимость вынужденно снимается в области напряжений, значительно превышающих нормальное рабочее напряжение изоляции.

Чаще всего зависимость срока службы τ_c от напряжения выдержки U или напряженности E и абсолютной температуры T в определенном интервале времен выражается формулой

$$\tau_c = A_u e^{\frac{b}{T}} U^{-a} = A_E e^{\frac{b}{T}} E^{-a}, \qquad (4.6.20)$$

где показатель степени a зависит от рода воздействующего напряжения, напряженности, толщины диэлектрика, вида изоляции, технологии изготовления. Значение напряженности электрического поля определяет характер старения изоляции (область развития критических или начальных ЧР).

Характерные зависимости срока службы от напряженности электрического поля

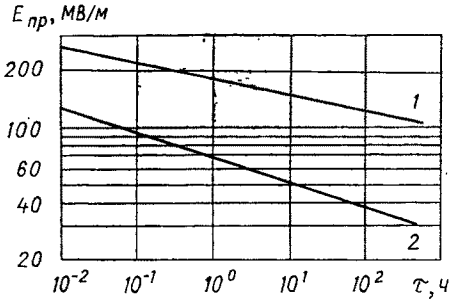


Рис. 4.6.6. Зависимость пробивной напряженности конденсаторной изоляции от времени выдержки при постоянном напряжении (*1*) и переменном напряжении промышленной частоты (*2*) при d=80 мкм

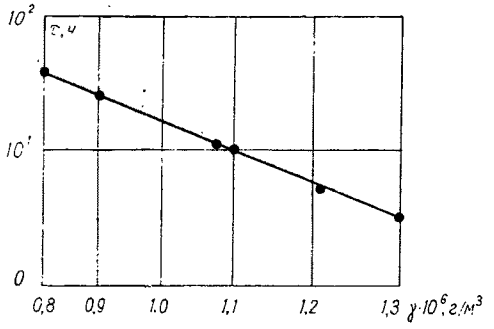


Рис. 4.6.7. Влияние объемной массы конденсаторной бумаги на средний срок службы бумажно-масляных секций при d=6×12 мкм, E==50 МВ/м

при переменном напряжении 50 Гц (амплитудное значение) и постоянном напряжении для бумажно-масляной конденсаторной изоляции приведены на рис. 4.6.6. Они хорошо отображаются формулой (4.6.20), в которой для переменного напряжения a=5—8, для постоянного — 8—14.

По данным [4.17], для конденсаторов, пропитанных хлордифенилом, зависимость срока службы от напряжения U и температуры конденсатора T можно представить в виде

$$\tau_c = \frac{A}{(UT)^{7,7}}, \qquad (4.6.21)$$

где T измеряется в °С. Уменьшение объемной массы бумаги приводит к снижению кратковременной электрической прочности изоляции, но влечет за собой увеличение напряжения возникновения ЧР, что объясняется уменьшением напряженности в прослойках жидкого диэлектрика, у которого диэлектрическая проницаемость меньше, чем у клетчатки. Следствием последнего является увеличение срока службы конденсаторов, работающих при промышленной и повышенной частотах с изоляцией из бумаги с пониженной плотностью.

На рис. 4.6.7 представлена зависимость среднего срока службы бумажно-масляных секций конденсаторов промышленной частоты от объемной массы бумаги [4.18]. Уменьшение толщины диэлектрика секции приводит к увеличению напряженности ЧР и замедлению процессов старения при заданных напряженностях. Это отражается ростом показателя a в (4.6.20) с уменьшением толщины диэлектрика.

Так как процессы электрического старения при напряженностях, близких к рабочим, связаны с развитием начальных ЧР, то можно предположить, что срок службы изоляции обратно пропорционален мощности ЧР. Для количественной оценки степени разрушения целесообразно воспользоваться энергетической характеристикой диэлектриков, связывающей энергию, переданную веществу, и степень его разрушения. Энергетическая характеристика B имеет физический смысл массы или объема вещества, разрушенного (образованного или выделенного) при воздействии разрядов с энергией в 1 Дж, и измеряется в кг/Дж, или м³/Дж [В.6].

Изоляция обладает способностью в течение определенного времени выдерживать приложенное напряжение и противостоять разрушающему действию процессов, протекающих при данном напряжении. Эту способность можно охарактеризовать внутренним ресурсом изоляции R, определяемым количеством твердого, жидкого или газообразного вещества, которое должно быть разрушено (образовано или выделено), чтобы привести к нарушению или резкому снижению электрической прочности изоляционной конструкции. Внутренний ресурс изоляции зависит от структуры и размеров изоляции, видов диэлектриков, входящих в эту структуру, а также строения изоляции, расположения электродов и их формы. Для конденсаторов, в которых

основное разрушение диэлектриков происходит по краю обкладок, внутренний ресурс изоляции целесообразно относить к единице длины края обкладок.

Для заданной изоляционной конструкции при изменении напряжения в определенных пределах в первом приближении этот ресурс может быть принят постоянным. В таком случае срок службы изоляции можно определить из выражения

$$R = B\int_0^{\tau_c} P_{\text{ЧР}}\,dt. \qquad (4.6.22)$$

В первом приближении можно принять, что на протяжении всего срока службы мощность ЧР $P_{\text{ЧР}}$ не изменяется во времени, так как обычно значительное изменение (увеличение) мощности ЧР происходит непосредственно перед пробоем изоляции. Тогда

$$\tau_c = \frac{R}{BP_{\text{ЧР}}}. \qquad (4.6.23)$$

Для изоляции, пропитанной нефтяным маслом, можно считать, что срок службы определяется временем, необходимым для образования газовых пузырьков, после появления которых напряжение ЧР сильно снижается, возникают критические ЧР, резко возрастает их интенсивность и быстро разрушается изоляция. В этом случае срок службы изоляции τ_c выражается формулой

$$\tau_c \approx \frac{C_г V_ж}{B_г P_{\text{ЧР}}}, \qquad (4.6.24)$$

где $C_г$ — растворимость газа в жидком диэлектрике; $V_ж$ — объем жидкого диэлектрика в конденсаторе. Зависимость $P_{\text{ЧР}}$ от переменного напряжения выражается по (2.42) и тогда

$$\tau_c = \frac{C_г V_ж}{B_г A_3 U^a} = A_U U^{-a}, \qquad (4.6.25)$$

где $a = 5—7$ — для переменного напряжения промышленной частоты.

Формула (4.6.25) соответствует экспериментально полученной зависимости (4.6.20).

В конденсаторах, пропитанных трихлордифенилом, газовыделения в процессе электрического старения практически не происходит, и срок службы определяется предельным увеличением tgδ изоляции за счет разложения хлордифенилов ЧР и взаимодействия продуктов разложения с твердым диэлектриком. Предельно допустимые значения tgδ конденсаторов при рабочих напряженностях могут быть найдены на основании теплового расчета конденсатора (см. § 4.5). Поэтому для расчета срока службы конденсаторов с пропиткой хлордифенилами необходимо знать зависимость tgδ изоляции от энергии ЧР, выделяемой в конденсаторах. Эти зависимости могут быть установлены экспериментально. Зная предельно допустимые значения tgδ изоляции, можно на основании данных зависимостей определить энергию ЧР $W_{\text{ЧР0}}$, затраченную на повышение tgδ изоляции, до значения, соответствующего нарушению тепловой устойчивости конденсатора. Тогда срок службы конденсатора

$$\tau_c = \frac{W_{\text{ЧР 0}}}{P_{\text{ЧР}}}. \qquad (4.6.26)$$

Учитывая зависимость мощности ЧР $P_{\text{ЧР}}$ от напряженности электрического поля в соответствии с выражением (2.4.4), можно получить зависимость срока службы от напряженности электрического поля:

$$\tau_c = \frac{W_{\text{ЧР 0}}}{A_4 E^a} = A_E E^{-a}. \qquad (4.6.27)$$

Рабочие напряженности электрического поля и ресурс конденсаторов. Значение рабочей напряженности в изоляции силовых конденсаторов должно выбираться с учетом длительно воздействующего рабочего напряжения и кратковременных перенапряжений, воздействующих на конденсатор в процессе эксплуатации.

При выборе значения рабочей напряженности по длительно воздействующему рабочему напряжению должны обеспечиваться: 1) отсутствие недопустимого перегрева диэлектрика за счет потерь, выделяющихся в конденсаторе; 2) требуемый срок службы, что определяется прежде всего допустимыми характеристиками начальных ЧР.

При выборе значения рабочей напряженности по кратковременным перенапряжениям необходимы: 1) отсутствие пробоя изоляции при воздействии перенапряжений, что определяется ее кратковременной прочностью; 2) отсутствие необратимых повреждений и ухудшений характеристик изоляции при воздействии перенапряжений, что определяется характеристиками критических ЧР.

Особенности выбора рабочих напряженностей для конденсаторов, работающих при напряжении промышленной частоты. Для повышения удельных параметров конденсатора следует увеличивать рабочую напряженность $E_{\text{раб}}$, но одновременно при этом возрастает мощность потерь и значительно снижается его ресурс. Количество тепла, отводимое от конденсатора без превышения температуры диэлектрика сверх допустимой, ограничено; оно определяет верхний предел $E_{\text{раб}}$. Наибольшая допустимая для данного диэлектрика температура зависит от требуемого ресурса (см. § 6.1): для бумажного диэлектрика с хлордифениловой пропиткой, работающего при технической частоте, наибольшая допустимая рабочая температура диэлектрика, обеспечивающая экономически целесообразный ресурс, равна примерно 95°С. Такая же предельная рабочая температура допустима и для комбинированного бумажно-пленочного диэлектрика с хлордифениловой пропиткой.

Для бумажно-масляного диэлектрика наибольшая допустимая рабочая температура составляет 65°С. При проектировании конденсатора должен быть предусмотрен определенный запас по его термической устойчивости. На основании тепловых расчетов определяется значение $E_{раб}$, которое затем согласуется с величиной, рассчитанной по допустимым значениям характеристик ЧР во всем температурном диапазоне работы конденсатора. Поэтому для данного диэлектрика должны быть известны зависимости напряженности возникновения критических ЧР от температуры и толщины. При этом характеристики начальных ЧР определяют допустимую рабочую напряженность, а характеристики критических ЧР — главным образом допустимые уровни кратковременных перенапряжений.

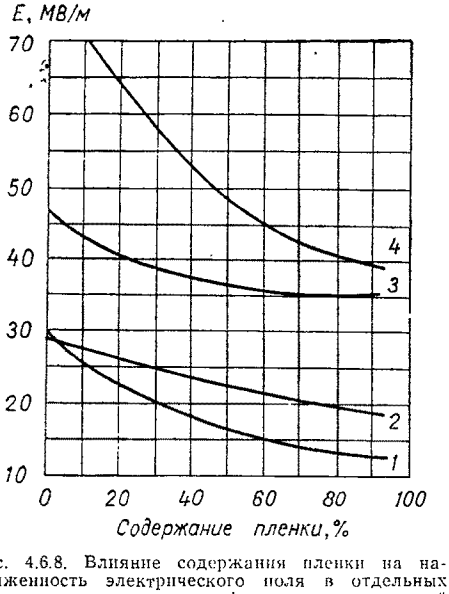


Рис. 4.6.8. Влияние содержания пленки на напряженность электрического поля в отдельных компонентах: в трихлордифениле и пропитанной им бумаге (*1*); в бумаге, пропитанной нефтяным маслом (*2*); в нефтяном масле и пленке при пропитке нефтяным маслом (*3*); в пленке при пропитке трихлорднфенилом (*4*). Коэффициент запрессовки 0,9; $E_{ср} = 30$ МВ/м

Для бумажно-масляной изоляции допустимые рабочие напряженности ограничиваются допустимой мощностью ЧР, при которой за заданный срок службы изоляции исключено возникновение сосредоточенных газовых включений. Тогда для заданного срока службы τ_c из (4.6.24) можно найти допустимую мощность ЧР:

$$P_{ЧР.\,доп} \leqslant \frac{C_г V_ж}{B_1 \tau_c} \qquad (4.6.28)$$

и с учетом (2.4.2) допустимую напряженность электрического поля

$$E_{раб} = \left(\frac{C_г V_ж}{A_1 B \tau_c}\right)^{1/a}. \qquad (4.6.29)$$

Подсчеты показывают, что для бумажно-масляной изоляции конденсаторов с толщиной диэлектрика 80 мкм при среднем сроке службы около 30 лет и напряжении промышленной частоты допустимая рабочая напряженность составляет 12—14 МВ/м.

При изменении толщины диэлектрика изоляции из конденсаторной бумаги КОН-1 с толщиной листа 10—12 мкм допустимая рабочая напряженность

$$E_{раб} = 3{,}3 \cdot d^{-0{,}58}, \qquad (4.6.30)$$

где $E_{раб}$ выражена в МВ/м, d — в мм.

Для изоляции с пропиткой хлордифенилами допустимые рабочие напряженности могут определяться также допустимой мощностью ЧР. Используя (4.6.27), имеем

$$E_{раб} = \left(\frac{W_{ЧР\,0}}{\tau_c A_1}\right)^{1/a}. \qquad (4.6.31)$$

При этом в связи со значительно большей стойкостью хлордифенилов к разложению в электрическом поле допустимые рабочие напряженности могут быть существенно увеличены по сравнению с изоляцией, пропитанной нефтяным маслом:

$$E_{раб} = 4{,}3 \cdot d^{-0{,}58}. \qquad (4.6.32)$$

Здесь $E_{раб}$ измеряется в МВ/м, d — в мм. Это соответствует $E_{раб} = 16$—20 МВ/м для изоляции толщиной 50—80 мкм. Однако столь высокие рабочие напряженности могут привести к перегреву конденсатора и потере его теплового равновесия. Поэтому использование указанных рабочих напряженностей возможно только при одновременном применени ряда мероприятий по уменьшению tgδ изоляции от значений $(2{,}0—2{,}5) \cdot 10^{-3}$, характерных для изоляции с пропиткой нефтяным маслом, до $(1{,}2—1{,}5) \cdot 10^{-3}$. Это достигается за счет применения малопотерьной конденсаторной бумаги пониженной объемной массы оксидной бумаги, специальных эпоксидных соединений, добавляемых в пропитывающий состав, уменьшающих влияние загрязнений на возрастание tgδ, и других мер.

Для изоляции с применением неполярных синтетических пленок (в основном полипропиленовых) рабочую напряженность можно увеличить. Это позволяет уменьшить толщину диэлектрика секции, так как пленочные диэлектрики обладают высокой кратковременной прочностью, особенно при малых толщинах изоляции (20—30 мкм). Уменьшение толщины диэлектрика d в соответствии с (2.4.5) приводит к увеличению напряженности ЧР приблизительно пропорционально $1/\sqrt{d}$, а следовательно, и к росту допустимой рабочей напряженности.

Использование пленки вызывает перераспределение напряженности электрического поля между компонентами изоляции. Напряженность E в i-й компоненте n-компонентной изоляции

$$E_i = \frac{d}{k\varepsilon_i \sum_j \frac{d_j}{\varepsilon_j}} E_{ср}', \qquad (4.6.33)$$

где $E_{ср}$ — средняя напряженность в изоляции между обкладками; d_j — толщина слоя изоляции с диэлектрической проницаемостью ε_j; k — коэффициент запрессовки.

Как следует из формулы (4.6.33), наличие неполярной пленки с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_п$, меньшей диэлектрической проницаемости пропитывающей жидкости $\varepsilon_ж$, приводит к уменьшению напряженности в пропитывающем составе и увеличению напряженности в пленке. При этом наиболее перспективно применение неполярной полипропиленовой пленки.

На рис. 4.6.8 [4.19] приведены зависимости напряженности электрического поля в отдельных составляющих бумажно-пленочной изоляции (пропитывающее вещество, пропитанная бумага и неполярная пленка) от процентного содержания пленки по отношению к объему всей изоляции при пропитке нефтяным маслом и трихлордифенилом.

Как следует из рис. 4.6.8, при пропитке нефтяным маслом электрическая нагрузка пленки и масла примерно одинакова и почти вдвое превышает нагрузку пропитанной бумаги. Пленка оказывается нагруженной ниже своих возможностей, а пропитывающее вещество — значительно выше. При использовании пропитки с повышенной диэлектрической проницаемостью (например, трихлордифенила) напряженность в пропитывающем составе и пропитанной бумаге резко снижается по сравнению с пропиткой маслом, а нагрузка наиболее устойчивой компоненты — пленки — наоборот, увеличивается. Это позволяет также увеличить среднюю напряженность электрического поля при неизменной напряженности в пропитывающей жидкости и пропитанной бумаге. Применение неполярных пленок приводит также к уменьшению tgδ изоляции и возможности повышения допустимых напряженностей с точки зрения допустимого перегрева изоляции и развития теплового пробоя.

Допустимые рабочие напряженности комбинированной пленочной изоляции целесообразно выбирать так, чтобы бумага, пропитанная жидким диэлектриком, работала при принятых для бумажной изоляции рабочих напряженностях. Последние могут быть определены по (4.6.29) или (4.6.32). При этом средняя рабочая напряженность комбинированного диэлектрика будет зависеть от относительного содержания пленки в диэлектрике [4.20]:

$$E_{комб} = E_б[a_п\varepsilon_б + (1-a_п)\varepsilon_п]/\varepsilon_п, \quad (4.6.34)$$

где $a_п$ — относительное содержание пленки в объеме диэлектрика; $\varepsilon_п$ и $\varepsilon_б$ — диэлектрическая проницаемость пленки и пропитанной бумаги соответственно.

Удельная объемная энергия конденсатора с комбинированным диэлектриком

$$W_v = \varepsilon_{ср} E^2_{комб}/2 = \varepsilon_б E_б^2 [a_п \varepsilon_п + (1 - a_п)\varepsilon_п]/(2\varepsilon_п) = W_{vб}[a_п\varepsilon_б + (1 - a_п)\varepsilon_п]/\varepsilon_п, \quad (4.6.35)$$

где $W_{vб} = \varepsilon_б E_б^2/2$ — удельная энергия аналогичного конденсатора с бумажным диэлектриком.

Выражение (4.6.35) может быть представлено также в следующем виде [4.20]:

$$\frac{W_{vб}}{W_v} = \frac{\varepsilon_п}{a_п\varepsilon_б + (1 - a_п)\varepsilon_п}. \quad (4.6.36)$$

С ростом содержания пленки $a_п$ в комбинированном диэлектрике W_v будет возрастать, и скорость приращения будет тем выше, чем больше отношение $\varepsilon_б/\varepsilon_п$.

Как показывает опыт создания конденсаторов с комбинированным диэлектриком, при $d = 60$ мкм допустимые рабочие напряженности можно принять: в бумажной компоненте, пропитанной трихлордифенилом, 16—18 МВ/м, в комбинированной изоляции при $a_п = 60$—70% — 30—37 МВ/м, в пленке — 40—50 МВ/м.

В современных бумажных конденсаторах с трихлордифениловой пропиткой, работающих на частоте 50—60 Гц, при материалах высокого качества и высоком уровне технологии рабочая напряженность поля при пониженных толщинах диэлектрика (50—60 мкм) может достигать 22—22,5 МВ/м; при этом 90% конденсаторов будут работать примерно 20 лет.

В конденсаторах повышенной частоты (до 10 кГц) с бумажно-хлордифениловым диэлектриком значение рабочей напряженности определяется только тепловым режимом.

Особенности выбора рабочих напряженностей для конденсаторов, работающих при постоянном напряжении. Рабочие напряженности для таких конденсаторов выбираются с учетом электрохимического старения диэлектрика и старения вследствие ЧР, а также воздействующих на конденсатор перенапряжений в процессе эксплуатации. При выборе рабочих напряженностей должна учитываться длительность эксплуатации конденсатора под напряжением. Так, в конденсаторах для испытательных установок постоянного напряжения, работающих с большими перерывами, допустимые рабочие напряженности могут быть увеличены по сравнению с конденсаторами, непрерывно находящимися под воздействием постоянного напряжения.

Если конденсатор работает при наличии переменной составляющей (при пульсирующем напряжении), то необходимо отдельно выбирать рабочую напряженность для переменной составляющей напряжения. При этом необходимо учитывать, что допустимая рабочая напряженность для переменной составляющей должна быть снижена приблизительно на 20% по сравнению с переменным напряжением, так как наложение постоянного напряжения уменьшает напряжение начальных ЧР на 15—20%.

Для конденсаторов, непрерывно работающих при постоянном напряжении, рабочая напряженность принимается равной 35—40 МВ/м. Для конденсаторов, работаю-

щих в испытательных схемах, напряженность может быть увеличена до 60—80 МВ/м.

Особенности работы импульсных конденсаторов в рабочем режиме

Влияние режима работы на допустимые рабочие напряженности. Для импульсных конденсаторов выбор допустимых рабочих напряженностей определяется кратковременной электрической прочностью изоляции и характеристиками ЧР.

Необходимо учитывать, что импульсное напряжение воздействует на конденсатор в течение ограниченного времени, что позволяет значительно повысить допустимую рабочую напряженность.

Расчет допустимых рабочих напряженностей при ограниченном сроке службы конденсаторов (не менее 10^4 импульсов) и малой частоте повторения (менее 10 импульсов в минуту) приводит к значениям, лежащим между $E_н$ и $E_{кр}$. Так, для конденсаторов с изоляцией толщиной 100 мкм из конденсаторной бумаги КОН-2, пропитанной конденсаторным маслом, величину рабочей напряженности можно принять равной 60—65 МВ/м. При значительном сокращении срока службы ее можно увеличить до 80 МВ/м.

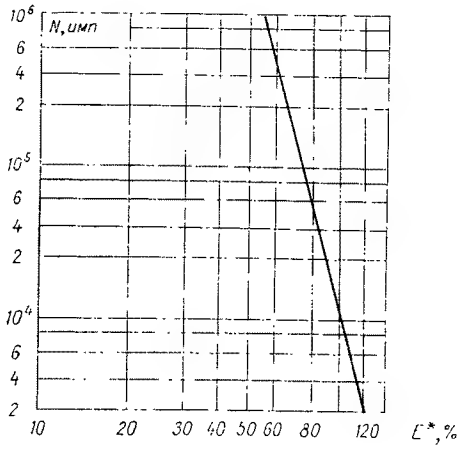


Рис. 4.6.9. Зависимость ресурса N (числа импульсов) конденсаторов от относительного значения напряженности электрического поля. Конденсаторная бумага, пропитанная касторовым маслом, d=80 мкм

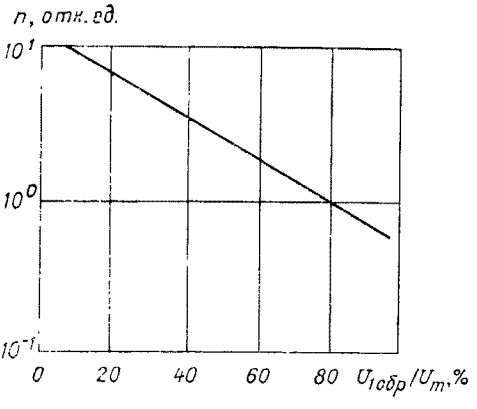


Рис. 4.6.10. Зависимость относительного значения ресурса конденсаторов от амплитуды первого полупериода обратного знака $U_{1\,обр}$ (n=1 при $U_{1\,обр}/U_m$=80%)

Для изоляции из бумаги КОН-2, пропитанной касторовым маслом или хлорированными жидкими диэлектриками, вследствие большой стойкости этих диэлектриков к воздействию ЧР для срока службы не менее 10^4 импульсов рабочую напряженность можно повысить до 80 МВ/м. При сокращении срока службы величину рабочей напряженности можно повышать до 100—120 МВ/м.

На интенсивность ЧР в диэлектрике конденсатора сильно влияет не только напряженность электрического поля, но и форма воздействующего напряжения, причем, как следует из (2.4.22) или (2.4.23), больше всего сказывается декремент колебаний контура разряда конденсатора. С увеличением декремента колебаний уменьшается число ЧР за каждый импульс напряжения, что приводит к снижению разрушения диэлектрика при воздействии импульсного напряжения. Увеличение декремента колебаний от 1,25 до 3,00 приводит к уменьшению интенсивности разложения жидкого диэлектрика в пять—шесть раз. При этом допустимую рабочую напряженность можно увеличить на 20—30%.

Для бумажно-пленочной и пленочной изоляций вследствие уменьшения напряженности в прослойке жидкого диэлектрика рабочая напряженность принимается выше, чем для бумажной, и доходит в отдельных конструкциях импульсных конденсаторов с ограниченным сроком службы до 200 МВ/м.

При большой частоте следования импульсов (более 10 в минуту) рабочая напряженность конденсаторов может определяться тепловым режимом его работы.

Значение допустимой рабочей напряженности определяется как процессами старения в разрядном и зарядном режимах, главным образом вследствие ЧР (при малой частоте повторения импульсов обычно менее 0,2 Гц), так и тепловым режи-

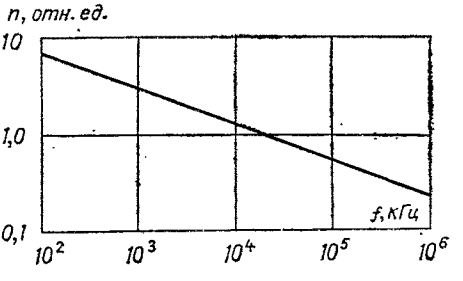


Рис. 4.6.11. Зависимость относительного значения ресурса от частоты колебаний в разрядном режиме

мом конденсатора (при большом числе разрядов в секунду — в основном более 0,2 Гц).

Допустимые рабочие напряженности при ограниченном сроке службы и малой частоте повторения импульсов зависят от вида диэлектрика изоляции секций, толщины диэлектрика, формы импульса, возникающего при разряде конденсатора, частоты колебаний в разрядном режиме, требуемых показателей надежности конденсаторов.

Характерная зависимость ресурса конденсаторов (при колебательном разряде) от относительного значения рабочей напряженности приведена на рис. 4.6.9. Она соответствует формуле (4.6.20), в которой показатель степени a зависит от вида и толщины диэлектрика, формы импульса при разряде и лежит в пределах от 6 до 10.

При эксплуатации импульсных конденсаторов необходимо учитывать, что увеличение декремента колебаний в разрядном режиме или при переходе от колебательного к апериодическому разряду конденсатора приводит к существенному увеличению ресурса и к возможности повышения его рабочей напряженности (рис. 4.6.10) [В.4]. Тем не менее повышение рабочего напряжения конденсатора при изменении его режима работы может быть произведено только с разрешения соответствующего завода-изготовителя, так как в ряде случаев величина рабочего напряжения может быть ограничена другими конструктивными особенностями конденсатора (например, электрической прочностью изоляции выводов конденсатора). Допустимая рабочая напряженность и ресурс конденсатора зависят также от частоты колебаний в разрядном режиме при неизменном декременте колебаний. Однако с изменением частоты колебаний в несколько раз он изменяется незначительно (рис. 4.6.11).

Работа керамических конденсаторов при длительном воздействии рабочего напряжения. Электрическое старение керамических конденсаторов под воздействием рабочего напряжения происходит под влиянием различных факторов. Энергия, выделяющаяся в порах при ЧР (особенно при высокой частоте напряжения), может привести к местному разогреву керамики, возникновению местных механических напряжений и появлению микротрещин, а с дальнейшим развитием разрядов в порах и микротрещинах — к электрическому пробою конденсатора.

Старение керамики происходит при длительном воздействии постоянного напряжения (электрохимическое старение). В этом случае возможно проникновение атомов металла вглубь диэлектрика и возникновение проводящих или полупроводящих образований. Чаще всего эти проводящие образования возникают у отрицательного электрода конденсатора, и напряжение перераспределяется по толще изоляции конденсатора, что может привести к пробою.

Выбор допустимых рабочих напряженностей $E_{раб}$ в керамических конденсаторах производится на основании кратковременной электрической прочности с учетом процессов старения. Обычно $E_{раб}$ принимается в два—три раза меньше кратковременной электрической прочности и составляет около 1,0—1,5 МВ/м для высокочастотных и 1,5—2,5 МВ/м — для низкочастотных конденсаторов.

§ 4.7. Удельные параметры одиночных конденсаторов и батарей

Удельные параметры необходимы для оценки и сопоставления массогабаритных или стоимостных показателей конденсаторов различных типов с целью определения их технического уровня, областей рационального применения и др.

Удельные параметры конденсаторов различны при работе в синусоидальном, несинусоидальном и пульсирующем напряжениях. Следует выделять также удельные параметры в номинальном и других рабочих режимах.

Удельными параметрами конденсаторов при синусоидальном напряжении являются: *удельная реактивная мощность*—мощность, приходящаяся на единицу объема, массы и стоимости:

$$Q_v = \frac{Q}{V};\ Q_m = \frac{Q}{m};\ Q_{ц} = \frac{Q}{Ц}, \quad (4.7.1)$$

где $Q = U^2 2\pi f C$ — допустимая для данной частоты реактивная мощность конденсатора; V, m и Ц — соответственно его объем, масса и стоимость; U — допустимое для данной частоты действующее значение напряжения (§ 7.2).

Теоретическое значение удельной реактивной мощности конденсатора с металлизированными обкладками в области частот, когда допустимое напряжение ограничено электрической прочностью, рассчитываемое для объема, занимаемого рабочим диэлектриком, равно:

$$Q_v = 0{,}55 \cdot 10^{-4} f \varepsilon_r E^2 \text{ Мвар/м}^3,$$

где f — частота, измеряемая в Гц; E — напряженность электрического поля — в МВ/м.

У конденсаторов с фольговыми обкладками при прочих равных условиях удельные реактивные мощности примерно в $\frac{d}{d + d_0}$ раз меньше, чем у металлизированных конденсаторов. Лучшими удельными реактивными мощностями обладают конденсаторы с наибольшим для данной частоты f произведением $\varepsilon_r E^2$.

В области частот, где напряженность электрического поля в рабочем диэлектрике конденсатора определяется из условия ограничения мощности ЧР (см. § 4.6), значение Q_v почти пропорционально частоте.

В табл. 4.7.1 приведены теоретические значения удельной реактивной мощности для конденсаторов с различными диэлектриками.

В области частот, где допустимые напряженности электрического поля выбира-

Таблица 4.7.1

Конденсатор	Частота f, Гц	Расчетные значения		Удельная реактивная мощность Q_V, Мвар/м³
		ε_r	E, МВ/м	
Бумажный:				
с полярной пропиткой	50	6,0	20	6,60
с неполярной пропиткой	50	3,5	15	2,16
Лавсановый	50	3,2	20	3,52
	100	3,2	20	7,04
Поликарбонатный	400	2,8	12	8,90
Полистирольный	$5\cdot10^3$	2,2	10	60,00
Фторопластовый	10^4	2,0	8	70,00
Бумажно-полипропиленовый с полярной пропиткой	400	3,1	15	15,40

ются исходя из ограничения максимальной температуры внутри конденсатора (§ 4.6 и 7.2), при условии $P=\text{const}$ теоретическое значение удельной реактивной мощности

$$Q_V = 0{,}55\cdot10^{-1}\varepsilon_r f_1 \frac{\operatorname{tg}\delta(f_1)}{\operatorname{tg}\delta(f)} E^2(f_1),$$

где $\operatorname{tg}\delta(f)$ — значение тангенса угла потерь конденсатора на частоте f, при которой определяется Q_V; $\operatorname{tg}\delta(f_1)$ — значение $\operatorname{tg}\delta$ конденсатора на граничной частоте f_1, разделяющей области частот с упомянутыми критериями выбора рабочей напряженности.

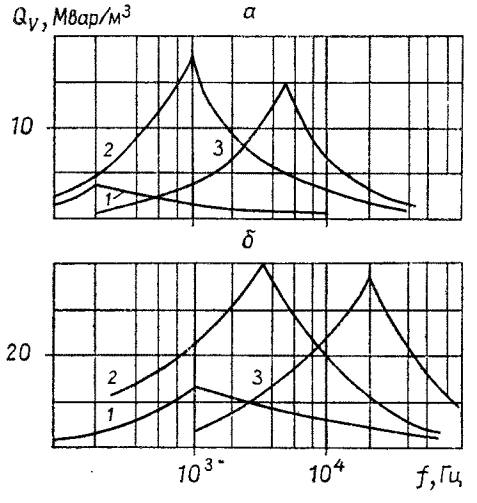


Рис. 4.7.1. Зависимость удельной реактивной мощности от частоты для одиночно расположенных конденсаторов типов К75-10 (*1*), К77-5 (*2*) и К72-11 (*3*), имеющих $U_н=250$ В и $C_н=3{,}3$ мкФ при естественном воздушном охлаждении ($T_0=30$°С) в непрерывном (*а*) и прерывистом режимах (*б*)

На частоте f_1 удельная реактивная мощность конденсатора максимальна. Выше этой частоты допустимая напряженность электрического поля для обеспечения $P=\text{const}$ должна снижаться пропорционально

$$\sqrt{\frac{f\operatorname{tg}\delta(f)}{f_1\operatorname{tg}\delta(f_1)}}.$$

С дальнейшим увеличением частоты возрастает доля потерь в металлических частях конструкции (см. § 2.3), и при некоторой частоте f_2 потребуется ограничение на постоянном уровне действующего значения тока конденсатора ($I=\text{const}$). Это приведет к необходимости снижения рабочей напряженности электрического поля пропорционально частоте, т. е. удельная реактивная мощность в области частот выше f_2 будет изменяться по закону

$$Q_V = 0{,}55\cdot\varepsilon_r \frac{\operatorname{tg}\delta(f_1)}{\operatorname{tg}\delta(f_2)} E^2(f_1)\frac{f_1 f_2}{f}.$$

Дальнейшее снижение удельной реактивной мощности может быть связано с увеличением последовательного активного сопротивления конденсатора из-за проявления поверхностного эффекта и потерь в металлическом корпусе на высоких частотах (см. § 2.3).

В реальных конденсаторах также проявляются все отмеченные зависимости удельной реактивной мощности от частоты.

Конкретные значения частот f_1, f_2 и напряженности $E(f_1)$ зависят от типа (конструкции), параметров конденсаторов, условий их охлаждения и режима нагружения.

Для конденсаторов с неполярным диэлектриком область частот между f_1 и f_2 может отсутствовать (кривые *2* и *3* на рис. 4.7.1, *а* и *б*), тогда как у конденсаторов с полярным диэлектриком она достаточно обширна (кривая *1*). Из рис. 4.7.1 видно, что в прерывистом режиме нагружения при длительности работы $t_р=10$ с и длительности паузы $t_п=40$ с максимум удельных реактивных мощностей возрастает и сдвигается в область более высоких частот.

Таким образом, для расчета удельных параметров конденсаторов при синусоидальном напряжении необходимо знать зависимость допустимого рабочего напряжения от частоты (§ 7.1) и условий охлаждения, по которым находится их допустимая реактивная мощность.

Если конденсатор спроектирован для режима работы с несинусоидальной формой напряжения, то определив по методике, изложенной в § 7.2 или § 7.10, предельно допустимое для него напряжение синусоидальной формы, можно найти его удельную реактивную мощность для той или иной частоты.

Конденсаторы, разработанные для одних и тех же (или достаточно близких) условий эксплуатации, сопоставляются по удельным реактивным мощностям, рассчи-

Таблица 4.7.2

Тип конденсатора	Номинальные параметры			
	$U_н$, кВ	$Q_н$, квар	Q_v, Мвар/м³	Q_m, квар/кг
КС	0,38	50	1,70	0,90
	0,66	45	1,55	0,82
	1,05	75	2,56	1,40
	3,15			
	6,30	75	2,56	1,40
	10,50	100	3,40	1,80
КСП	1,05	75	2,56	1,40
КСШ	6,30	50	1,73	0,90
	0,66	40	2,67	1,33
		80	2,8	1,33
КСК	1,05	63	4,2	2,1
		125	4,4	2,1
	3,15			
	6,30	75	5,0	2,5
	10,50	150	5,2	2,5
ЛСМ	0,25; 0,40	0,09—5,00	0,60—1,87	0,33—1,00
ЛСЕ	0,40	0,15—0,40	1,4—1,7	0,7—0,9

Примечание. Для конденсаторов типа КС указаны максимальные удельные реактивные мощности.

тываемым по номинальным параметрам. В частности, это конденсаторы для компенсации реактивной мощности в энергосистемах и на промышленных предприятиях, а также в электротермических установках. В табл. 4.7.2 приведены удельные параметры силовых конденсаторов для компенсации реактивной мощности на частоте 50 Гц, а в табл. 4.7.3 — конденсаторов электротермических установок.

Сопоставляя табл. 4.7.1 с данными рис. 4.7.1 и табл. 4.7.2 и 4.7.3, видим, что теоретические значения удельных реактивных мощностей существенно больше, чем достигаемые на практике, в силу обстоятельств, отмеченных ниже при рассмотрении удельной емкости и заряда конденсаторов.

Таблица 4.7.3

Тип конденсатора	Номинальные параметры				
	f_2, Гц	$U_н$, кВ	$Q_н$, квар	Q_v, Мвар/м³	Q_m, квар/кг
ЭСВ	500	0,8—2,0	200	12,5	5,7
	1000	1,0—2,0	250	15,6	7,1
	2400	0,5—2,0	300	18,8	8,6
	4000	0,8—2,0	350	21,9	10,0
	10 000	0,5—0,8	400	25,0	11,4
ЭСВК	500	0,8—2,0	300	18,8	8,6
	1000	0,8—2,0	450	28,2	12,8
	2400	0,5—2,0	550	34,5	15,7
	4000	0,5—2,0	550	34,5	15,7
	10 000	0,5—0,8	650	40,7	18,6

Удельные параметры конденсаторов при несинусоидальном напряжении. Для импульсных конденсаторов основными удельными параметрами являются значения энергии (Дж), приходящиеся на единицу объема, массы или стоимости конденсатора:

$$W_v = \frac{CU^2}{2V};\ W_m = \frac{CU^2}{2m};$$

$$W_ц = \frac{CU^2}{2Ц}. \qquad (4.7.2)$$

Здесь U — напряжение, до которого заряжается конденсатор. В частном случае при сопоставлении конденсаторов с разной конструкцией, но с одинаковым режимом работы и номинальными напряжениями, вместо U в формулу (4.7.2) нужно подставить $U_н$. Чтобы найти экстремальную для заданных условий работы удельную энергию, в (4.7.2) следует использовать предельно допустимое рабочее напряжение конденсаторов, определяемое с учетом рекомендаций седьмой главы.

Так как предельно допустимое рабочее напряжение на конденсаторе зависит от их конструкции, номинальных данных, параметров режима, условий охлаждения и других факторов (см. § 4.6, 6.1—6.3, 7.2, 7.3), то энергии конденсаторов и соответственно их удельные энергии также зависят от этих же причин. В частности, они различны для разных частот повторения, длительностей фронтов, характеристик теплового режима и т. д. Они могут существенно отличаться при непрерывных и прерывистых режимах нагружения (см. § 5.1). Кривые для некоторых типов конденсаторов (рис. 4.7.2, *а, б*) иллюстрируют некоторые из этих положений.

Теоретическое значение удельной энергии намотанных конденсаторов с металлизированными обкладками равно:

$$W_v = 4{,}42 \cdot 10^{-3} \varepsilon_r E^2 \text{ кДж/м}^3,$$

где величина E выражена в МВ/м.

В области инфранизких частот повторения, где рабочая напряженность электрического поля E определяется электрической прочностью (см. § 4.6 и 6.2), значение $E \approx \text{const}$, т. е. удельная энергия конденсаторов не зависит от частоты повторения. Далее она уменьшается из-за необходимости снижения рабочего напряжения, обусловленного действием ЧР (см. § 6.2).

С повышением частоты повторения в конденсаторе растет мощность тепловыделения (см. § 5.3), и при некоторой частоте f_1' она достигает предельно допустимого по нагреву значения (§ 6.1). Выше этой частоты рабочее напряжение конденсатора должно снижаться для обеспечения условия $P = \text{const}$, что вызывает соответствующее уменьшение удельной энергии конденсаторов (см. рис. 4.7.2). Дальнейшее (выше некоторой частоты f_2'), более быстрое снижение удельной энергии конденсаторов связано с понижением рабочего на-

Таблица 4.7.4

Тип, конструкция и номинальные параметры конденсаторов	Удельные энергии		Напряженность электрического поля E, МВ/м	Частота повторения $f_п$, Гц	Ресурс (количество импульсов)
	W_v, кДж/м³	W_m, Дж/кг			
Бумажные с полярной пропиткой	30—126 7	20—70 3,7	70—100 22	0,1 10—25	10^4 $7{,}9\cdot10^8$
Бумажно-лавсановые ($U_н$=0,75—5,00 кВ; $C_н$=20—100 мкФ)	29—185	16,5—105,0	—	10^4—10	10^5
Лавсановые ($U_н$=0,63—5,00 кВ; $C_н$=20—80 мкФ)	4,3—150,0	2,4—83,0	—	10—10^2	10^6
Бумажно-пленочные:					
К75-11-2 кВ-100 мкФ	173,0	91	—	0,5	$5\cdot10^3$
К75-14-3 кВ-100 мкФ	101,0	60	—	1,0	10^5
К75-17-1 кВ-50 мкФ	41,5	20	—	10^2	$3{,}6\cdot10^7$
К75-18-1 кВ-100 мкФ	58,0	32	—	3,0	10^6
К75-19-2 кВ-100 мкФ	39,0	23	—	10,0	$3{,}6\cdot10^7$
К75-20-4 кВ-100 мкФ	94,0	70	—	$3\cdot10^{-2}$	10^5
К75-27-2 кВ-100 мкФ	132,0	74	—	10^{-1}	—
К75-28-3 кВ-100 мкФ	16,4	9,2	—	1	$5\cdot10^4$
К75-30 ($U_н$=5; 10; 20 кВ и $C_н$=2; 1; 0,47 мкФ)	31,0	15,0	—	50	$2{,}5\cdot10^4$—10^5
К75-40 ($U_н$=0,75—5,00 кВ; $C_н$=20—100 мкФ)	29—185	17—104	—	10	10^5
ПКГИ ($U_н$=1—50 кВ; $C_н$=10^3—2 мкФ)	0,3—3,0	0,12—1,47	—	$4\cdot10^{-2}$—10^4	—
Алюминиевые оксидно-электролитические					
К50-23-500 В-1000 мкФ	400	230,0	—	10^{-1}	$5\cdot10^4$

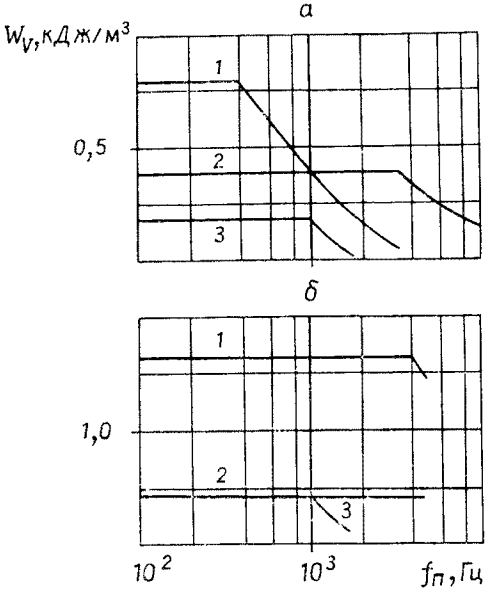


Рис. 4.7.2. Зависимость удельной энергии одиночно расположенных конденсаторов типов К77-5 (*1*), К72-11 (*2*), К75-10 (*3*), имеющих $U_н$=250 В и $C_н$=3,3 мкФ для естественного воздушного охлаждения (T_0=+50°С) при длительном воздействии симметричного трапецеидального напряжения с косинусоидальными фронтами длительностью $5\cdot10^{-5}$ (*а*) и 10^{-4} с (*б*)

пряжения (и соответственно напряженности электрического поля в рабочем диэлектрике E) пропорционально частоте и вызвано необходимостью ограничения на допустимом уровне действующего значения тока (§ 7.1 и 7.4).

Для реальных конденсаторов с металлизированными обкладками снижение допустимой напряженности поля E может быть обусловлено необходимостью ограничения импульсного тепловыделения (см. § 6.1). Поэтому при малых длительностях импульсов тока удельная энергия таких конденсаторов снижается (см. рис. 4.7.2). Для конденсаторов с фольговыми обкладками это ограничение отсутствует. Однако теоретическое значение удельной энергии у них примерно в $\frac{d}{d_0 + d}$ раз меньше, чем у металлизированных, так как толщина фольговых обкладок d_0 сопоставима с толщиной диэлектрика d.

В прерывистых режимах нагружения конденсаторы допускают бо́льшие, чем при непрерывных режимах, значения мощности тепловыделения (см. § 6.1) и соответственно рабочие напряжения (см. седьмую главу), поэтому удельные энергии конденсаторов могут быть существенно выше. В табл. 4.7.4 приведены удельные энергии для импульсных конденсаторов некоторых типов, иллюстрирующие изложенное выше. Таким образом, на значения удельной

энергии и реактивной мощности конденсаторов существенно влияют два фактора: относительная диэлектрическая проницаемость рабочей изоляции (ε_r) и напряженность электрического поля в ней.

В качестве удельных параметров конденсаторов при сложных формах несинусоидального напряжения, например при воздействиях напряжения, имеющего произвольный спектр, можно использовать удельные реактивные мощности, рассчитывая их для допустимого рабочего напряжения при частоте основной гармоники этого напряжения. В случае типовых форм воздействующего напряжения (см. § 5.1) можно поступать аналогично либо использовать удельные энергии (4.7.2), подставляя вместо U значение амплитуды напряжения на конденсаторе (U_m).

Удельными параметрами конденсаторов при постоянном и пульсирующем напряжениях являются *удельная емкость*

$$C_v = \frac{C}{V};\ C_m = \frac{C}{m};\ C_{\text{ц}} = \frac{CU}{\text{Ц}} \quad (4.7.3)$$

или *удельный заряд*

$$q_v = \frac{CU}{V};\ q_m = \frac{CU}{m};\ q_{\text{ц}} = \frac{CU}{\text{Ц}}, \quad (4.7.4)$$

где V, m и Ц — соответственно объем конденсатора, его масса и стоимость.

Расчет удельных емкостей и зарядов по объему рабочего диэлектрика позволяет проанализировать влияние конструктивных особенностей конденсаторов на их удельные параметры (теоретические значения см. табл. 4.7.5). Удельная емкость, рассчитанная по объему рабочего диэлектрика, для конденсатора с металлизированными обкладками

$$C_v = 8{,}85\frac{\varepsilon_r}{d^2}\ \Phi/\text{м}^3,$$

где ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость; d — толщина диэлектрика в мкм. Для фольговых конденсаторов, у которых толщина обкладок соизмерима с толщиной диэлектрика, влияние последнего на удельную емкость слабее:

$$C_v = 8{,}85\frac{\varepsilon_r}{(d + d_0)d},$$

где d_0 — толщина обкладок.

Как показал анализ [4.21], удельная емкость конденсатора сильно зависит от напряжения конденсатора, поскольку толщина диэлектрика $d = U/E$, где E — рабочая напряженность электрического поля. Полагая в первом приближении, что E не зависит от толщины диэлектрика, можно получить, что удельная емкость конденсаторов с металлизированными обкладками, нанесенными на диэлектрик,

$$C_v = 8{,}85\frac{\varepsilon_r E^2}{U^2}\ \Phi/\text{м}^3,$$

где E выражена в МВ/м, а U — в В.

Таблица 4.7.5

Диэлектрик	Расчетное значение ε_r диэлектрика	E, МВ/м	Толщина диэлектрика d, мкм	C_v, Ф/м³	q_v, Кл/м³
Бумага, пропитанная полярной жидкостью	6,0	30	10	0,53	160
			20	0,13	80
			50	0,02	31
Бумага, пропитанная неполярной жидкостью	3,5	30	10	0,31	92
			20	0,08	46
			50	0,01	18
Лакопленка	3,8	30	1	33,30	1050
			2	8,40	540
			3	3,80	360
			6	0,93	180
Лавсан	3,2	40	3	3,15	375
			6	0,79	190
			10	0,28	115
Поликарбонат	2,8	40	3	2,74	330
			6	0,69	165
			10	0,25	100

Удельный заряд таких конденсаторов $q_v = C_v U = 8{,}85\frac{\varepsilon_r E^2}{U}$ Кл/м³ зависит от напряжения слабее, чем удельная емкость.

В реальных конденсаторах значительную долю объема корпуса занимают вспомогательный диэлектрик (корпусная изоляция, диэлектрик на закраинах) и другие конструкционные элементы. Их доля сильно возрастает с уменьшением номинальной емкости конденсатора. В результате удельная емкость конденсаторов одного и того же типа и номинального напряжения зависит также и от номинальной емкости. Кроме этого, рабочая напряженность электрического поля не всегда одинакова для однотипных конденсаторов, имеющих различные номинальные напряжения.

В качестве иллюстрации в табл. 4.7.6 приведены зависимости удельных емкостей и удельных зарядов для лакопленочных конденсаторов от номинальной емкости и номинального напряжения.

Существенное отличие реально достигнутых значений удельных характеристик конденсаторов (см. табл. 4.7.6) от теоретических (см. табл. 4.7.5) объясняется, кроме изложенных выше причин, также тем, что на значения эквивалентной диэлектрической проницаемости и толщины диэлектрика у низковольтных непропитанных конденсаторов сильно влияет плотность намотки секций.

При малой толщине ленты диэлектрика эта плотность ниже, так как механическая прочность его невелика. Возникающие воздушные зазоры оказываются соизмеримыми по толщине с диэлектриком, что приводит к значительному снижению эквивалентной диэлектрической проницаемости и увеличению общей толщины диэлектрика.

Таблица 4.7.6

Тип конденсатора; номинальное напряжение $U_н$, В	Номинальная емкость $C_н$, мкФ					Толщина диэлектрика d, мкм
	0,47	1,5	4,7	10	22	
К76П-1; 63	0,38 / 24	0,6 / 38	0,87 / 55	1 / 63	1,22 / 77	3,0
К76-2; 100	0,38 / 38	0,6 / 60	0,87 / 87	0,83 / 83	0,92 / 92	—
К76-3; 250	—	0,28 / 70	0,31 / 78	0,3 / 75	—	6,0
К76-4; 25	0,87 / 22	2,1 / 52	2,1 / 52	2,0 / 50	—	2,0

Примечание. В числителе указана удельная емкость (Ф/м³), в знаменателе — удельный заряд (Кл/м³).

Значения удельных емкостей и удельных зарядов низковольтных конденсаторов сильно зависят также от типа обкладок, поскольку при малой толщине диэлектрика таких конденсаторов (до 10—20 мкм) фольговые обкладки (толщиной 6—16 мкм) занимают значительный объем.

В табл. 4.7.7 приведены данные по максимальным значениям удельных емкостей и зарядов конденсаторов некоторых типов, отличающихся по конструкции и номинальным данным. Конденсаторы с оксидным диэлектриком благодаря очень малым значениям d обладают наивысшими удель-

Таблица 4.7.7

Тип диэлектрика и обкладок	Тип конденсатора	Номинальные параметры		C_v, Ф/м³	q_v, Кл/м³
		$U_н$, В	$C_н$, мкФ		
Лавсан, фольговые	К73-9	100—630	$0{,}47\cdot10^{-3}$—0,47	$0{,}55\cdot10^{-3}$—0,10	0,35—10,0
	К73-15	100—630	$0{,}47\cdot10^{-3}$—0,47	$1{,}5\cdot10^{-3}$—0,12	0,94—12,00
Лавсан, металлизированные	К73П-2	400—1000	0,5—15,0	0,01—0,08	10—31
	К73П-4	250	0,5—15,0	0,04—0,077	10—19
	К73-11	63—630	10^{-3}—22	$2{,}7\cdot10^{-3}$—1,5	1,7—95,0
	К73-16	63—1600	$4{,}7\cdot10^{-3}$—22	$0{,}47\cdot10^{-3}$—1,2	5,6—78,0
	К73-17	63—630	10^{-2}—4,7	0,069—0,700	9—58
	К73-26	63	33	1,2	74
			68	1,4	88
			100	1,5	97
Бумажно-пленочный, металлизированные	К75-15	$(3—50)\cdot10^3$	$5\cdot10^{-3}$—10	$3{,}7\cdot10^{-6}$—$4{,}3\cdot10^{-3}$	0,185—13,000
	К75-24	400—1600	2—10	$(1{,}7—9{,}4)\cdot10^{-3}$	27—38
	К75-45	$(2{,}5—63{,}0)\cdot10^3$	0,1—10,0	$3\cdot10^{-6}$—$2\cdot10^{-3}$	0,22—57,00
Поликарбонат, металлизированные	К77-1	63—400	10^{-3}—22	0,117—0,774	11—48
	К77-2	63; 100	10^{-2}—2,2	0,46*	30*
	К77-4	160	0,1—15,0	0,2*	30*
Бумага, металлизированные	МБГО	160—600	0,25—30,00	0,03—0,32	17—70
Окись алюминия	К50-6	25—160	1—500	2,7—43,0	135—1080
	К50-6	6,0	5—500	62—110	370—660
	К50-7	160—450	5—500	0,8—7,8	300—125,0
	К53-14	6,3	0,1—100,0	16—100	100—630
Окись ниобия	К53-4	6,0	0,68—100,00	10—168	60—1000

* Максимальные значения C_v и q_v.

ными параметрами, причем при низких напряжениях (порядка единиц вольт) оксидно-полупроводниковые ниобиевые конденсаторы имеют экстремальные q_v и C_v.

Если детально рассмотреть зависимость удельной емкости и заряда от емкости у конденсаторов одного и того же типа и номинального напряжения, то можно обнаружить, что удельные характеристики не возрастают монотонно с увеличением номинальной емкости. Это связано с тем, что ряды стандартных габаритных размеров корпусов не всегда согласуются с требуемыми значениями емкости.

Учитывая изложенное выше, по удельным емкостям и зарядам конденсаторы допустимо сопоставлять, если они имеют одинаковые или достаточно близкие номинальные величины емкостей и напряжений.

У оксидно-электролитических конденсаторов емкость существенно зависит от частоты (см. § 4.1). Поэтому при сопоставлении удельных характеристик таких конденсаторов в случае использования их в фильтрах пульсирующего напряжения на частотах, отличных от тех, на которых нормируется номинальная емкость, в расчетные соотношения (4.7.3) и (4.7.4) следует подставлять значения емкости конденсаторов, измеренные (или рассчитанные) на частоте пульсации.

Поскольку при пульсирующем напряжении через конденсатор протекает переменный ток, то для сопоставления конденсаторов по их нагрузочной способности используют величину допустимого действующего значения переменного тока, приходящуюся на единицу емкости, т. е. удельный переменный ток:

$$I_{\text{у}\sim} = \frac{I}{C_{\text{н}}}. \qquad (4.7.5)$$

Он существенно зависит от конструкции и номинальных параметров конденсаторов, температуры охлаждающей среды и других факторов, поскольку они определяют допустимое действующее значение тока (см. § 6.1). Поэтому сопоставление конденсаторов по такой характеристике правомерно только при одних и тех же условиях.

По удельному переменному току конденсаторов существенно легче производить их предварительный выбор (см. восьмую главу).

На практике в качестве удельных параметров часто используют также *удельные объемы, массы и стоимости* конденсаторов, т. е. объем, массу и стоимость конденсатора, приходящиеся на одну микрофараду емкости, один микрокулон заряда, один киловар реактивной мощности или один джоуль энергии, т. е. величины, обратные параметрам [см. формулы (4.7.1)—(4.7.4)].

Эти параметры удобно использовать для оценки объема, массы или стоимости конденсаторов при заданных значениях их емкости, реактивной мощности или энергии.

Таким образом, расчетные удельные параметры конденсаторов, найденные для номинальных условий эксплуатации и номинального ресурса, могут быть использованы для сопоставления конденсаторов только при одинаковых или достаточно близких условиях. В противном случае удельные параметры следует находить, определив предварительно допустимые для заданных условий эксплуатации (электрического режима, режима охлаждения и т. д., требуемого ресурса) рабочие напряжения, т. е. после приведения этих данных к базовым условиям (см. седьмую главу).

Удельные параметры батарей конденсаторов. На практике часто бывает, что требуемые значения емкости или необходимого рабочего напряжения превосходят все номинальные значения емкости и напряжения конденсаторов выбранного типа. Тогда единичные конденсаторы соединяют в батареи последовательно, параллельно или смешанно.

Удельные параметры батарей конденсаторов заметно отличаются от удельных параметров одиночных конденсаторов в связи с наличием в батареях зазоров между отдельными конденсаторами. Зазоры обусловлены технологическими требованиями, а также условиями, связанными с обеспечением необходимого теплового сопротивления конденсатора (см. § 4.4.).

Наименьшие зазоры могут быть получены при комплектовании батарей из конденсаторов в призматических прямоугольных корпусах при их работе в режимах с малой мощностью тепловыделения. В этом случае удельные характеристики изменяются на 5÷10% в зависимости от габаритных размеров конденсаторов.

Если определяющим критерием при выборе конденсатора послужила мощность тепловыделения (см. § 5.3), то величина зазоров может быть существенно больше, чем это необходимо из технологических соображений. Тогда удельные объемные характеристики батарей следует оценивать по суммарному объему, который здесь может быть на 30—40% больше, чем у одиночных конденсаторов.

Батареи из конденсаторов с корпусами цилиндрической формы даже при минимальных зазорах между образующими цилиндров имеют примерно на 30% больший объем при неплотной и на 16% при плотной упаковках по сравнению с конденсаторами в прямоугольных корпусах.

Так как с уменьшением зазоров ухудшаются условия охлаждения (увеличиваются тепловые сопротивления конденсаторов), то допустимая мощность тепловыделения и соответственно допустимое напряжение уменьшаются, что приводит к снижению удельной реактивной мощности или энергии конденсатора. При увеличении зазоров картина обратная. Поскольку при малых зазорах объем батареи меняется незначительно, а при больших зазорах слабо изменяются напряжения, мощности и энергии, то существует оптимальная величина зазора, при которой удельные объемы батарей минимальны. Анализ показывает, что при естественном воздушном охлаждении оптимальный зазор между конденсаторами в батарее составляет 5-—

20 мм для мало- и среднегабаритных конденсаторов и 20—40 мм — для крупногабаритных. Однако при оптимальном зазоре удельные объемы батарей на 10—30% больше, чем у одиночного конденсатора.

Несмотря на существование оптимальной величины зазора, на практике не всегда следует его обеспечивать, так как теоретический выигрыш в удельных характеристиках часто не может быть реализован из-за фиксированных параметров воздействующего напряжения. В таких случаях величина минимального зазора и получаемые при этом удельные характеристики определяются из условия обеспечения допустимого теплового режима конденсаторов (см. § 6.1).

В приложении 6 и 7 приведены зависимости удельных параметров конденсаторов от параметров электрического режима работы.

§ 4.8. Общие сведения о надежности конденсаторов

Вопросу надежности конденсаторов как составных элементов современной радиоэлектронной аппаратуры и ряда электроэнергетических устройств в последние годы уделяется большое внимание. Количество конденсаторов в этих устройствах в несколько раз превышает число электровакуумных и полупроводниковых приборов. В частности, на единицу электронной аппаратуры приходится от 30 до 600 000 конденсаторов различных типов [В.11].

Основные показатели, термины и определения в области надежности технических изделий даны ГОСТ 13377-75, а также в [4.22].

Под *надежностью* изделия понимается его свойство выполнять заданные функции при сохранении эксплуатационных показателей в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки, т. е. продолжительности эксплуатации или испытания в заданных пределах.

Надежность — комплексное свойство, которое в зависимости от назначения изделия и условий его эксплуатации может включать такие свойства, как *ремонтнопригодность, сохраняемость, долговечность* и *безотказность* в отдельности или определенное сочетание их. Эти свойства являются качественными характеристиками надежности. Показатели, характеризующие указанные свойства в отдельности, являются дополнительными показателями надежности и служат их *количественными* характеристиками.

Качественные характеристики надежности

Под *неремонтнопригодным* изделием понимается изделие, работоспособность которого в случае отказа либо не поддается, либо не подлежит восстановлению в пределах срока службы. В исключительно редких случаях для дорогостоящих конденсаторов при некоторых отказах возможно и целесообразно их восстановление. Однако в подавляющем большинстве конденсаторы—неремонтнопригодные изделия, поэтому требование о ремонтнопригодности отпадает.

Сохраняемость—это свойство изделия сохранять эксплуатационные показатели в течение и после срока хранения и транспортирования, установленного в технической документации.

При хранении конденсаторов в условиях, установленных технической документацией, их сохраняемость высока и практически не влияет на его надежность. Таким образом, надежность электрических конденсаторов определяется только его долговечностью и безотказностью.

При определении различных показателей надежности часто пользуются понятиями работоспособность и отказ.

Под *работоспособностью* понимается такое состояние конденсатора, при котором он в данный момент времени соответствует всем требованиям, установленным в отношении параметров (например, C, $\mathrm{tg}\delta$, $R_{\text{из}}$, $I_{\text{ут}}$ и др.), характеризующих нормальное выполнение заданных функций. Эти требования приводятся во всех технических условиях на конденсаторы.

Неработоспособность конденсатора—это такое состояние, при котором значение хотя бы одного заданного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям, установленным нормативно-технической документацией.

Различают исправное и неисправное состояния конденсатора. *Исправное*—это состояние, при котором конденсатор соответствует всем требованиям, установленным нормативно-технической документацией, *неисправное*—при котором он не соответствует хотя бы одному из этих требований.

Неисправный конденсатор может быть работоспособным, например, не выполнено требование к маркировке, окраске и т. д. В случае невыполнения конденсатором заданных функций, вследствие возникших дефектов или недопустимого изменения параметров, происходит его отказ. *Отказ*—это нарушение работоспособности конденсатора.

По характеру возникновения принято различать отказы *внезапные,* характеризующиеся скачкообразным изменением одного или нескольких заданных параметров конденсатора, и *постепенные,* когда изменение одного или нескольких этих параметров происходит медленно, постепенно. Внезапные отказы могут возникать при неблагоприятных сочетаниях в случайные моменты времени воздействующих факторов: вибраций, ударов, повышенных температур, радиации, влаги, недопустимых перегрузок по напряжению (перенапряжения) и току. В результате происходит *полный отказ* конденсатора.

Полные отказы конденсаторов характеризуются следующими причинами: замыкание обкладок «накоротко» между собой или с корпусом, «обрыв» цепи, разрушение выводов, дефекты элементов конструкции

при монтаже, транспортировке, хранении, вследствие чего происходит полная утрата работоспособности [В.30]. Полные отказы могут возникать как в результате постепенного ухудшения электрофизических параметров и характеристик конденсаторов в процессе эксплуатации, носящих куммулятивный характер, так и внезапно.

Как правило, внезапные полные отказы являются *зависимыми,* т. е. обусловлены повреждениями или отказами других элементов устройства или же отказами в системах принудительного охлаждения, управления, защиты и т. д. Могут быть также *независимые* полные внезапные отказы конденсаторов, например, в результате их электрического пробоя при номинальном напряжении вследствие постепенного снижения электрической прочности диэлектрика, без заметного изменения осиовных параметров.

Постепенные отказы вызваны изменением (уходом) параметров конденсаторов сверх допустимых значений, указанных в ТУ, либо заданных разработчиком аппаратуры в силу специфики работы устройства, где конденсатор находится. Постепенные отказы могут быть *частичными,* например когда изменение емкости, тангенса угла потерь или сопротивления изоляции конденсатора фильтра низких или верхних частот превышает допустимое по ТУ значение, а отказа фильтра (нарушение его работоспособности) не возникает, т. е. в результате частичного отказа конденсатор может быть использован по назначению, но с меньшей эффективностью.

Постепенные отказы связаны с медленными процессами старения конденсаторов (тепловыми, ионизационными, электрохимическими), приводящими к постепенному ухудшению параметров и характеристик. Эти отказы, таким образом, поддаются прогнозированию, если в *процессе эксплуатации* (время с момента изготовления конденсатора до момента возникновения предельного состояния) производить периодическое измерение параметров конденсаторов. Однако часто имеют место постепенные полные отказы, когда ухудшение основных параметров приводит в конечном счете к полной потере работоспособности.

По причинам возникновения различают *конструкционные, производственные и эксплуатационные отказы,* происходящие в результате нарушения установленных правил и (или) норм конструирования, процессов изготовления, условий эксплуатации.

Как уже указывалось, надежность конденсатора включает в себя такие свойства, как *долговечность и безотказность.*

Долговечность—это свойство сохранять работоспособность до наступления *предельного состояния,* которое определяется невозможностью дальнейшей эксплуатации конденсатора, обусловленной неустранимым нарушением требований безопасности или неустранимым снижением эффективности, например, резкнм изменением емкости, зиачительным снижением сопротивления изоляции или увеличением тангенса угла потерь. Конденсаторы достигают предельного состояния при возникновении отказа. Признаки (критерии) предельного состояния конденсаторов устанавливаются в ТУ.

Безотказность—свойство конденсатора сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки (продолжительности работы). Этим свойством конденсатор обладает как в период его использования, так и в период хранения и транспортирования.

Показатели надежности (количественные характеристики)

Показателями долговечности конденсаторов являются *ресурс и срок службы. Ресурс*—это наработка конденсатора до предельного состояния, оговоренного в технической документации. Обычно для конденсаторов различают гамма-процентный и средний ресурсы.

Гамма-процентный—это ресурс, который имеет и превышает в среднем обусловленное число процентов конденсаторов. Обусловленный процент γ является регламентированной вероятностью. Если, например $\gamma=90\%$, то соответствующий ресурс конденсатора $\tau_\gamma=90\%$ будет иметь 90 конденсаторов из 100, т. е. у каждого из них наработка будет большей или равной $\tau_\gamma=90\%$. Аналогично поступают при других значениях величины γ. Гамма-процентный ресурс τ_γ определяется из уравнения

$$P(\tau_\gamma)=\frac{\gamma}{100}, \qquad (4.8.1)$$

где $P(\tau_\gamma)=\int\limits_{(\tau_\gamma)}^{\infty} f(t)\,dt$—вероятность безотказной работы конденсатора в интервале времени от 0 до τ_γ; $f(t)$—плотность распределения вероятности отказов, или дифференциальная функция распределения отказов.

Например, в случае распределения Вейбулла уравнение (4.8.1) принимает вид

$$\exp\left[-\left(\frac{\tau_\gamma}{a}\right)^{-b}\right]=\frac{\gamma}{100}, \qquad (4.8.2)$$

где a и b — параметры распределения, откуда

$$\tau_\gamma=a\sqrt[b]{-\ln\frac{\gamma}{100}}. \qquad (4.8.3)$$

При экспоненциальном распределении из (4.8.3) при $b=1$ получаем

$$\tau_\gamma=a\left(-\ln\frac{\gamma}{100}\right)=$$

$$=\tau_{ср}\left(-\ln\frac{\gamma}{100}\right), \qquad (4.8.4)$$

где $\tau_{ср}$ — средняя наработка до отказа (математическое ожидание наработки кон-

Таблица 4.8.1

Типы конденсаторов	Интенсивность отказов $\lambda_0 \cdot 10^6$, 1/ч
Бумажные с номинальным напряжением до 600 В	0,0025 0,04—0,01
Бумажные с номинальным напряжением свыше 600 В	0,09 0,2350—0,0083
Керамические постоянной емкости	0,15 1,640—0,042
Керамические переменной емкости	0,02 0,351—0,012
Слюдяные	0,075 0,132—0,005
Слюдяные с номинальным напряжением до 600 В	0,0375 0,066—0,009
Слюдяные с посеребренными пластинками	0,083 0,410—0,025
Слюдяные фольговые	0,045 0,076—0,014
Стеклянные	0,06 0,8700—0,0005
Танталовые	0,6 1,934—0,108
Масляные	0,3 1,95—0,12
Воздушные переменные	0,034 0,082—0,010
Электролитические	0,035 0,513—0,003
Электролитические алюминиевые	0,135

Примечание. Значения интенсивностей отказов приведены в виде дроби: в числителе—средние значения интенсивностей отказов, в знаменателе—максимальные и минимальные значения.

денсатора до отказа). Если, например, $\gamma=90\%$, то из уравнения (4.8.4) получаем

$$\tau_{\gamma=90\%} = 0{,}105 \cdot \tau_{ср}. \qquad (4.8.5)$$

Средний ресурс—математическое ожидание ресурса конденсатора.

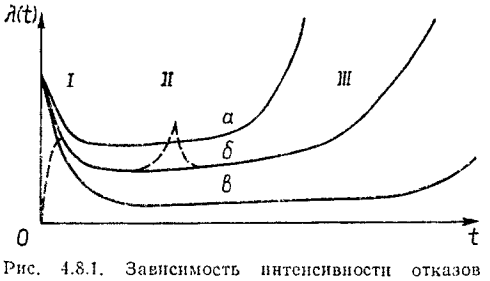


Рис. 4.8.1. Зависимость интенсивности отказов от времени и нагрузки при напряжениях выше номинального (*а*), при номинальном (*б*) и ниже номинального (*в*)

Под сроком службы конденсатора понимается календарная продолжительность его эксплуатации до момента возникновения предельного состояния. Различают средний и гамма-процентный сроки службы. *Средний срок службы* — это математическое ожидание срока службы. *Гамма-процентный срок службы* — календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигает предельного состояния с заданной вероятностью γ процентов.

Ресурс и срок службы конденсаторов являются важными технико-экономическими характеристиками. Для подавляющего большинства конденсаторов они задаются в виде времени (часы). В ряде импульсных конденсаторов ресурс или срок службы могут быть заданы количеством импульсов, которые он должен выдерживать. Для конденсаторов, используемых для повыше-

ния коэффициента мощности в сетях промышленной частоты, на основании многочисленных отечественных исследований, а также мирового опыта эксплуатации обычно принимается ресурс примерно в 20 лет. Такой ресурс должны иметь не менее 90% конденсаторов.

Показателями безотказности конденсаторов являются *вероятность безотказной работы и интенсивность отказов. Вероятность безотказной работы* конденсатора $P(\tau)$ в интервале времени от 0 до τ — это вероятность того, что в заданном интервале не возникает его отказа:

$$P(\tau) = \int_{\tau}^{\infty} f(t)\,dt, \qquad (4.8.6)$$

где $f(t)$ — плотность вероятности распределения наработки. Она статистически определяется отношением числа конденсаторов $(N—N_0)$, безотказно проработавших до момента времени t, к общему числу конденсаторов N, работоспособных в начальный момент времени $t=0$;

$$P(t) = \frac{N - N_0}{N} = 1 - \frac{N_0}{N}, \qquad (4.8.7)$$

где N_0—число отказавших конденсаторов. Вероятностью противоположного события является *вероятность отказа*

$$R(t) = 1 - P(t). \qquad (4.8.8)$$

Связь между плотностью распределения вероятности возникновения отказа конденсаторов и вероятностью безотказной работы описывается соотношением

$$P(t) = \frac{f(t)}{\lambda(t)}, \qquad (4.8.9)$$

где $\lambda(t)$ — интенсивность отказов. *Интенсивностью отказов* $\lambda(t)$ называется условная плотность вероятности возникновения отказа конденсатора, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник.

В силу случайности процессов старения и причин отказов появление отказов во времени носит случайный характер и определяется средней интенсивностью отказов $\lambda(t)$. Статистически $\lambda(t)$ выражается числом отказов за промежуток времени от t до $t+\Delta t$, отнесенным к произведению количества конденсаторов, работоспособных в момент времени t на длительность интервала времени Δt:

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t+\Delta t)}{N(t)\,\Delta t}. \qquad (4.8.10)$$

Изменение интенсивности отказов во времени при различных, но неизменных условиях эксплуатации показано на рис. 4.8.1 [В.12]. На участке I, называемом участком приработки, выходят из строя конденсаторы с грубыми производственными дефектами (в основном технологического характера). При 100%-ном выходном и входном контроле, исключающем попадание в эксплуатацию конденсаторов с дефектами, приводящими к отказу в момент включения, кривая зависимости интенсивности отказов может иметь и другой характер, как показано штриховой линией. Участок II характеризуется пониженным уровнем и примерным постоянством интенсивности отказов и называется участком нормальной эксплуатации. Слабое возрастание интенсивности отказов на нем вызвано старением изоляции. Аномальный пик увеличения интенсивности отказов, показанный штриховой линией, обусловлен дефектами, вызванными транспортировкой, монтажом, а также негрубыми производственными дефектами [4.23].

Участок нормальной эксплуатации присущ всем типам конденсаторов и его начало зависит от величины участка приработки. На III участке, называемом участком старения или износа, наблюдается рост интенсивности отказов, обусловленный существенным старением диэлектрика и конструктивных элементов конденсатора. Начало участка интенсивного старения, как правило, наступает значительно позже установленных техническими условиями сроков службы (либо наработки) конденсаторов. Значения интенсивностей отказов конденсаторов λ_0 в нормальных условиях приведены в табл. 4.8.1.

Обычно конденсаторы в различных устройствах работают при меньших нагрузках (электрических, тепловых, механических),

Таблица 4.8.2

Условия эксплуатации аппаратуры	Вибрация K_1	Ударные нагрузки K_2	Суммарные воздействия
Лабораторные	1,00	1,00	1,00
Стационарные (полевые)	1,04	1,03	1,07
Корабельные	1,30	1,05	1,37
Автофургонные	1,35	1,08	1,46
Железнодорожные	1,40	1,10	1,54
Самолетные	1,46	1,13	1,65

Таблица 4.8.3

Влажность, %	T, °C	Поправочный коэффициент K_3
60—70	20—40	1,0
90—98	20—25	2,0
90—98	30—40	2,5

Таблица 4.8.4

Высота, км	Поправочный коэффициент K_4	Высота, км	Поправочный коэффициент K_4
0—1	1,00	8—10	1,25
1—2	1,05	10—15	1,30
2—3	1,10	15—20	1,35
3—5	1,14	20—25	1,38
5—6	1,16	25—30	1,40
6—8	1,20	30—40	1,45

Таблица 4.8.5

Типы конденсаторов	T, °С	Коэффициенты нагрузки $K_н$				
		0,1—0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Бумажные Керамические Слюдяные негерметизированные	20	0,06	0,08	0,10	0,18	0,23
	25	0,07	0,08	0,10	0,21	0,25
	30	0,07	0,08	0,11	0,22	0,27
	35	0,07	0,09	0,12	0,24	0,31
	40	0,07	0,09	0,13	0,28	0,35
	50	0,08	0,10	0,15	0,36	0,46
	60	0,10	0,12	0,20	0,45	0,62
	65	0,11	0,13	0,23	0,55	0,66
	70	0,13	0,15	0,26	0,60	0,83
	75	0,15	0,17	0,33	0,73	1,13
	80	0,17	0,22	0,43	0,92	1,46
	85	0,25	0,30	0,65	1,14	1,88
	90	0,33	0,38	0,82	1,70	2,40
	95	0,43	0,47	1,08	2,40	2,90
	100	0,55	0,57	1,36	3,00	3,40
Слюдяные герметизированные	20	0,28	0,36	0,49	0,18	0,23
	25	0,29	0,37	0,49	0,21	0,29
	30	0,30	0,38	0,50	0,22	0,27
	35	0,32	0,39	0,51	0,24	0,31
	40	0,34	0,42	0,54	0,28	0,35
	45	0,36	0,45	0,59	0,33	0,40
	50	0,38	0,49	0,63	0,36	0,46
	55	0,42	0,54	0,67	0,40	0,53
	60	0,46	0,61	0,75	0,45	0,62
	65	0,51	0,68	0,85	0,55	0,66
	70	0,58	0,76	0,96	0,60	0,83
	75	0,66	0,86	1,14	0,73	1,13
	80	0,75	0,97	1,40	0,92	1,46
	85	0,85	1,13	1,95	1,14	1,88
	90	0,98	1,30	2,80	1,70	2,40
	95	1,12	1,50	3,50	2,40	2,90
	100	1,30	1,70	4,50	3,00	3,40
Металлобумажные, стеклянные и пленочные	20	0,28	0,36	0,49	0,64	0,80
	25	0,29	0,37	0,49	0,66	0,88
	30	0,30	0,38	0,50	0,70	0,94
	35	0,32	0,39	0,51	0,75	1,00
	40	0,34	0,42	0,54	0,80	1,10
	45	0,36	0,45	0,59	0,86	1,25
	50	0,38	0,49	0,63	0,95	1,43
	60	0,46	0,61	0,75	1,19	2,00
	65	0,51	0,68	0,85	1,37	2,10
	70	0,58	0,76	0,96	1,58	2,30
	75	0,66	0,86	1,14	1,87	2,50
	80	0,75	0,97	1,40	2,10	2,80
	85	0,85	1,13	1,95	2,30	3,40
	90	0,98	1,30	2,80	2,70	3,80
	95	1,12	1,50	3,50	3,00	4,40
	100	1,30	1,70	4,50	3,50	5,00
Электролитические с алюминиевым анодом	20	0,65	0,48	0,40	0,48	0,65
	25	0,72	0,54	0,44	0,54	0,72
	30	0,82	0,60	0,48	0,60	0,82
	35	1,00	0,73	0,56	0,73	1,00
	40	1,24	0,90	0,64	0,90	1,24
	45	1,48	1,12	0,80	1,12	1,48
	50	1,73	1,40	1,17	1,40	1,73
	55	1,95	1,70	1,38	1,70	1,95
	60	2,30	2,10	1,80	2,10	2,30
	65	3,50	2,80	2,26	2,80	3,50
	70	4,30	3,60	2,90	3,60	4,30
	75	5,50	4,60	4,00	4,60	5,50
	80	7,00	5,60	4,40	5,60	7,00
	85	8,70	6,80	5,50	6,80	8,70
	90	11,0	8,00	6,50	8,00	11,0
	95	14,0	9,50	7,70	9,50	14,0
	100	18,00	11,4	9,00	11,4	18,0

Типы конденсаторов	T, С	Коэффициенты нагрузки $K_н$				
		0,1—0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Электролитические с танталовым анодом	20	0,39	0,20	0,20	0,20	0,39
	25	0,40	0,21	0,21	0,21	0,40
	30	0,41	0,22	0,22	0,22	0,41
	35	0,43	0,26	0,26	0,26	0,43
	40	0,47	0,30	0,30	0,30	0,47
	45	0,53	0,35	0,35	0,35	0,53
	50	0,57	0,40	0,40	0,40	0,57
	55	0,64	0,45	0,45	0,45	0,64
	60	0,70	0,50	0,50	0,50	0,70
	65	0,78	0,57	0,57	0,57	0,78
	70	0,86	0,65	0,65	0,65	0,86
	75	0,94	0,72	0,72	0,72	0,94
	80	1,05	0,80	0,80	0,80	1,05
	85	1,17	0,90	0,90	0,90	1,17
	90	1,30	1,00	1,00	1,00	1,30
	95	1,45	1,12	1,12	1,12	1,45
	100	1,65	1,25	1,25	1,25	1,65

чем это допускается ТУ. В этой связи их эксплуатационная надежность (т. е. способность выполнять заданные функции при сохранении заданных параметров и характеристик в процессе эксплуатации) оказывается значительно выше гарантируемой документацией на поставку конденсаторов. Поэтому количественные показатели надежности (интенсивности отказов), приводимые в ТУ на конденсаторы, предназначены для контроля уровня производства [В.30]. Этими величинами не следует пользоваться при расчете безотказности аппаратуры. Для оценки надежности конденсаторов в эксплуатационных режимах при расчете надежности устройства часто применяются поправочные коэффициенты к коэффициентам, полученным при лабораторных испытаниях. Ориентировочно принято, что отношение интенсивности отказов конденсаторов при их эксплуатации к гарантируемым ТУ значениям составляет: 0,01 — для стационарной и полустационарной, 0,04 — для корабельной и 0,4 — самолетной аппаратур [4.24].

Пересчет интенсивности отказов конденсаторов в номинальных (лабораторных) условиях λ_0 на соответствующие условия применения производится по формуле

$$\lambda = K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 \lambda_0, \qquad (4.8.11)$$

где K_1—K_5—поправочные коэффициенты, учитывающие соответственно влияния: механических факторов (K_1, K_2), влажности (K_3), высоты (K_4), коэффициента нагрузки и температуры (K_5). Под коэффициентом нагрузки понимается отношение рабочего напряжения на конденсаторе к номинальному, т. е. $K_н = \dfrac{U_р}{U_н}$.

Значения поправочных коэффициентов K_1—K_5 от указанных факторов приведены в табл. 4.8.2—4.8.5 [4.25]. Более полную информацию для расчета надежности аппаратуры дают функциональные зависимости параметров надежности конкретных типов конденсаторов от режима нагрузки. Интенсивность отказов конденсаторов увеличивается с ростом коэффициента нагрузки $K_н$. Эта зависимость обычно хорошо аппроксимируется степенной функцией.

§ 4.9. Расчет показателей надежности конденсаторов по экспериментальным данным

Для большинства конденсаторов основным показателем надежности является вероятность безотказной работы за заданное время или гамма-процентный ресурс. Основой для оценки надежности служит закон распределения ресурса, определяемый сопоставлением нескольких теоретических распределений [В.30]. Ниже излагается способ его отыскания по эксплуатационным данным или результатам испытаний для наиболее распространенных теоретических распределений: нормального, логарифмически-нормального, Вейбулла и экспоненциального.

Полученные наработки τ_i объемом N располагаются в вариационный ряд в возрастающем порядке, и резко выделяющиеся величины исключаются с помощью критерия Ирвина—при $N<50$ (при $N>50$ используется критерий достоверности), основанного на разности двух наибольших или наименьших величин:

$$\eta = \frac{\tau_{1\text{макс}} - \tau_{2\text{макс}}}{\sigma_1},$$

где σ_1 — среднее квадратичное отклонение

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(\tau_i - \overline{\tau})^2}$$

и $\overline{\tau}$ — средняя наработка $\overline{\tau} = \dfrac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\tau_i$.

Зная объем выборки N и задаваясь вероятностью P, из табл. 4.9.1 находим

$\eta_{табл}$. При $\eta > \eta_{табл}$ исследуемое значение отбрасывается как резко выделяющееся, при $\eta < \eta_{табл}$—оставляется. Затем определяется эмпирическая функция распределения $F_э(\tau_i)$. При $N < 40$

$$F_э(\tau_i) = \frac{i}{N+1},$$

где $i = 0, 1, 2, ..., N$. При $N > 40$ область определения τ_i, равная $\tau_{макс} - \tau_{мин}$ (где $\tau_{макс}$—максимальное и $\tau_{мин}$ — минимальное значения ряда), разбивается на L равных интервалов ($j = 1, 2, ..., L$) так, чтобы в каждом интервале было не менее четырехпяти результатов, а число интервалов — не менее пяти. Число интервалов L вычисляется по правилу Старджесса:

$$L = 1 + 3{,}3 \lg N.$$

Частость q_j переменной τ_i в каждом интервале определяется как

$$q_j = n_j / N,$$

где n_j—число значений τ_i в j-м интервале. По частостям q_j составляется статистический ряд в порядке нумерации интервалов, начиная слева, по которому вычисляется $F_э(\tau_i)$:

$$F_э(\tau_1) = 0;\ F_э(\tau_2) = q_1;\ F_э(\tau_3) =$$

$$= q_1 + q_2, ...,\ F_э(\tau_{L+1}) = \sum_{j=1}^{L} q_j = 1.$$

С помощью $F_э(\tau_i)$ находятся параметры теоретических распределений. Для этого они преобразуются к линейному виду

$$y = a + bx,$$

где y и x—индивидуальные для каждого теоретического распределения функции; a и b—содержащие искомые параметры распределений постоянные, рассчитываемые с помощью метода наименьших квадратов. Наиболее близкое к данному эмпирическому теоретическое распределение выбирается по сумме квадратов разностей между теоретическим $F(\tau_i)$ и эмпирическим $F_э(\tau_i)$ распределениями:

$$\Delta^2 = \sum_{i=1}^{N} [F(\tau_i) - F_э(\tau_i)]^2.$$

Таблица 4.9.1

N	$\eta_{табл}$	
	$P = 0{,}95$	$P = 0{,}99$
3	2,20	2,90
5	1,84	2,44
8	1,80	2,04
10	1,50	2,00
20	1,30	1,80
30	1,20	1,70
50	1,10	1,60

Теоретическое распределение, имеющее наименьшее по сравнению с другими значение Δ^2, будет наиболее точно описывать данное эмпирическое.

Для нормального распределения линейная функция имеет вид

$$u_i = \frac{\tau_i - \bar{\tau}}{\sigma},$$

где u_i—соответствующая τ_i квантиль, которая находится из таблицы функции нормального распределения, исходя из равенства

$$F_э(\tau_i) = F_0\left(\frac{\bar{\tau} - \tau_i}{\sigma}\right),$$

F_0—табулированная функция нормированного и центрированного нормального распределений. Заменой $a = -\bar{\tau}/\sigma$ и $b = 1/\sigma$ (где $\bar{\tau}$—математическое ожидание и σ—стандартное отклонение являются искомыми параметрами теоретического распределения) она приводится к виду

$$u_i = a + b\tau_i.$$

По методу наименьших квадратов получаем систему двух линейных уравнений

$$\sum_{i=1}^{N} (u_i - a - b\tau_i) = 0;$$

$$\sum_{i=1}^{N} (u_i\tau_i - a\tau_i - b\tau_i^2) = 0,$$

решая которую находим a и b и по ним—$\bar{\tau}$ и σ, затем определяем Δ^2.

Для логарифмически-нормального распределения ход расчета тот же, но вместо τ_i и $\bar{\tau}$ подставляются $\lg\tau_i$ и $\lg\bar{\tau}$ и

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N} (\lg\tau_i - \lg\bar{\tau})^2}.$$

В случае распределения Вейбулла

$$F_э(\tau_i) = 1 - \exp[-(\tau/a)^b].$$

Дважды логарифмируя и обозначая $-b\ln a = h$ и $\ln\ln[1/(1-F_э(\tau_i))] = y_i$, имеем

$$y_i = h + b\ln\tau_i.$$

Значения h, a и b находятся методом наименьших квадратов, аналогично изложенному выше. Математическое ожидание получаем по формуле

$$\bar{\tau} = ak_b$$

и среднее квадратическое отклонение — по

$$\sigma = a\,c_b.$$

Значения k_b и c_b определяются из табл. 4.9.2, затем вычисляется Δ^2.

Таблица 4.9.2

b	k_b	c_b	b	k_b	c_b
0,2	121,3	1923	1,9	0,887	0,486
0,3	9,245	50,00	2,0	0,886	0,463
0,4	3,323	10,45	2,1	0,886	0,443
0,5	2,000	4,472	2,2	0,886	0,425
0,6	1,505	2,645	2,3	0,886	0,408
0,7	1,266	1,851	2,4	0,886	0,393
0,8	1,133	1,428	2,5	0,887	0,380
0,9	1,073	1,199	2,6	0,888	0,367
1,0	1,000	1,000	2,7	0,889	0,355
1,1	0,965	0,878	2,8	0,890	0,344
1,2	0,941	0,787	2,9	0,891	0,333
1,3	0,924	0,716	3,0	0,893	0,325
1,4	0,911	0,660	3,2	0,896	0,307
1,5	0,903	0,613	3,4	0,898	0,292
1,6	0,897	0,574	3,6	0,899	0,277
1,8	0,889	0,511	3,8	0,904	0,266
			4,0	0,906	0,254

При экспоненциальном распределении

$$F_э(\tau_i) = 1 - \exp(-\lambda\tau_i)$$

и после логарифмирования

$$z_i = \ln[1/(1-F_э(\tau_i))] = \lambda\tau_i.$$

Методом наименьших квадратов находится λ и затем — Δ^2. Математическое ожидание

$$\overline{\tau} = 1/\lambda$$

и среднее квадратическое отклонение

$$\sigma = 1/\lambda.$$

Для распределения с наименьшим Δ^2 определяются нижняя $\underline{\tau}_н$, $\sigma_н$ и верхняя $\overline{\tau}_в$, $\sigma_в$.

Таблица 4.9.3

N	P^*			
	0,80	0,90	0,95	0,99
5	1,476	2,015	2,571	4,032
6	1,440	1,943	2,447	3,707
7	1,415	1,895	2,365	3,500
8	1,397	1,860	2,306	3,355
9	1,383	1,833	2,262	3,250
10	1,372	1,813	2,228	3,169
11	1,363	1,769	2,201	3,106
12	1,356	1,782	2,179	3,055
13	1,350	1,771	2,160	3,012
14	1,345	1,761	2,145	2,977
15	1,341	1,753	2,131	2,947
16	1,337	1,746	2,120	2,921
17	1,333	1,740	2,110	2,898
18	1,330	1,734	2,101	2,878
19	1,328	1,729	2,093	2,861
20	1,325	1,725	2,086	2,845
22	1,321	1,717	2,074	2,819
24	1,318	1,711	2,064	2,797
26	1,315	1,706	2,056	2,779
28	1,313	1,701	2,048	2,763
30	1,310	1,697	2,042	2,750
40	1,303	1,684	2,021	2,705
50	1,299	1,676	2,009	2,678

Таблица 4.9.4

N	P^*			
	0,95		0,99	
	k_1	k_2	k_1	k_2
5	0,672	2,09	0,576	3,00
6	0,690	1,92	0,597	2,62
7	0,705	1,80	0,616	2,38
8	0,718	1,71	0,631	2,20
9	0,729	1,65	0,645	2,08
10	0,739	1,59	0,656	1,98
11	0,748	1,55	0,667	1,90
12	0,755	1,52	0,677	1,83
13	0,762	1,49	0,685	1,78
14	0,769	1,46	0,693	1,73
15	0,775	1,44	0,700	1,69
16	0,780	1,42	0,707	1,66
17	0,785	1,40	0,713	1,63
18	0,790	1,38	0,719	1,60
19	0,794	1,37	0,725	1,58
20	0,798	1,36	0,730	1,56
22	0,805	1,34	0,739	1,52
24	0,812	1,32	0,747	1,49
26	0,818	1,30	0,755	1,46
28	0,823	1,29	0,762	1,44
30	0,828	1,27	0,768	1,42
40	0,847	1,23	0,792	1,34
50	0,861	1,20	0,810	1,30

доверительные границы с доверительной вероятностью $P^* = 0{,}8$—$0{,}9$. Для нормального и логарифмически-нормального распределений они вычисляются по формулам:

а) для математического ожидания

$$\underline{\tau}_н = \overline{\tau} - t_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{N-1}}; \quad \overline{\tau}_в = \overline{\tau} + t_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{N-1}},$$

где t_α — коэффициент Стьюдента, определяемый из табл. 4.9.3 при $K = N-1$;

б) для среднего квадратического отклонения

$$\sigma_н = k_1\sigma; \quad \sigma_в = k_2\sigma.$$

Таблица 4.9.5

N	P^*			
	0,80	0,90	0,95	0,99
5	1,62	2,05	2,54	3,91
6	1,54	1,90	2,29	3,36
7	1,48	1,80	2,13	3,00
8	1,43	1,72	2,01	2,75
9	1,40	1,66	1,91	2,58
10	1,37	1,61	1,83	2,42
11	1,35	1,57	1,78	2,31
12	1,33	1,53	1,73	2,21
13	1,31	1,50	1,69	2,13
14	1,29	1,48	1,65	2,08
15	1,28	1,46	1,62	2,01
20	1,24	1,37	1,51	1,81
25	1,21	1,33	1,44	1,68
30	1,18	1,29	1,39	1,60
40	1,16	1,24	1,32	1,50
50	1,14	1,21	1,28	1,43

Таблица 4.9.6

N	$P*$			
	0,80	0,90	0,95	0,99
5	0,75	0,62	0,55	0,43
6	0,76	0,65	0,57	0,46
8	0,78	0,68	0,61	0,50
10	0,80	0,70	0,64	0,53
15	0,83	0,74	0,68	0,59
20	0,85	0,77	0,72	0,63
25	0,86	0,79	0,74	0,66
30	0,87	0,80	0,76	0,68
40	0,88	0,83	0,78	0,71
50	0,89	0,84	0,80	0,74

Коэффициенты k_1 и k_2 определяются по табл. 4.9.4 при $K=N-1$. Доверительные границы математического ожидания распределения Вейбулла находятся по формулам

$$\bar{\tau}_н = \bar{\tau}\sqrt[b]{r_2} \text{ и } \bar{\tau}_в = \bar{\tau}\sqrt[b]{r_1},$$

а значения r_1 и r_2—по табл. 4.9.5 и 4.9.6. Нижняя и верхняя доверительные границы параметра λ экспоненциального распределения определяются из соотношений

$$\lambda_н = \lambda/r_1 \text{ и } \lambda_в = \lambda/r_3,$$

а коэффициенты r_1 и r_3—из табл. 4.9.5 и 4.9.7.

По функциям распределения наработок до отказа находятся вероятности безотказной работы $P(\tau)$. Для нормального и логарифмически-нормального распределений они имеют вид

$$P(\tau) = 1 - F\left(\frac{\bar{\tau}-\tau}{\sigma}\right);$$

$$P(\tau) = 1 - F\left(\frac{\lg\tau - \lg\bar{\tau}}{\sigma}\right),$$

Таблица 4.9.7

N	$P*$			
	0,80	0,90	0,95	0,99
5	0,63	0,54	0,48	0,38
6	0,66	0,57	0,51	0,41
7	0,68	0,59	0,53	0,44
8	0,70	0,62	0,55	0,46
9	0,72	0,63	0,57	0,48
10	0,73	0,65	0,59	0,50
11	0,74	0,66	0,60	0,51
12	0,75	0,67	0,62	0,53
13	0,76	0,68	0,63	0,54
14	0,77	0,69	0,64	0,55
15	0,78	0,70	0,65	0,56
20	0,81	0,74	0,69	0,60
25	0,83	0,76	0,72	0,64
30	0,84	0,78	0,74	0,66
40	0,87	0,81	0,77	0,70
50	0,88	0,83	0,79	0,73

где $F\left(\frac{\bar{\tau}-\tau}{\sigma}\right)$ и $F\left(\frac{\lg\tau - \lg\bar{\tau}}{\sigma}\right)$—теоретические функции распределения, определенные выше. Для распределения Вейбулла

$$P(\tau) = 1 - F(\tau) = \exp[-(\tau/a)^b]$$

и для экспоненциального

$$P(\tau) = 1 - F(\tau) = \exp(-\tau\lambda).$$

Задаваясь значениями $P(\tau)$, из приведенных формул можно найти соответствующие им наработки τ. Но ввиду большого объема вычислений расчеты целесообразно производить с помощью ЭВМ.

Литература к разделу I

Введение

В.1. *Ренне В. Т.* Электрические конденсаторы. Изд. 3-е, перераб. Л.: Энергия, 1969. 592 с.

В.2. *Ренне В. Т.* Пленочные конденсаторы с органическим синтетическим диэлектриком. Л.: Энергия, 1971. 239 с.

В.3. *Ренне В. Т., Багалей Ю. В., Фридберг И. Д.* Расчет и конструирование конденсаторов. Киев: Техніка, 1966. 325 с.

В.4. *Кучинский Г. С.* Высоковольтные импульсные конденсаторы. Л.: Энергия, 1973. 175 с.

В.5. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / *П. Н. Дашук, С. Л. Зайенц, В. С. Комельков* и др. М.: Атомиздат, 1970. 471 с.

В.6. Силовые электрические конденсаторы / *Г. С. Кучинский, Н. И. Назаров, Г. Т. Назарова, И. Ф. Переселенцев.* М.: Энергия, 1975. 248 с.

В.7. *Кучинский Г. С.* Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, 1979. 224 с.

В.8. *Койков С. Н., Цикин А. Н.* Электрическое старение твердых диэлектриков. М.—Л.: Энергия, 1968. 186 с.

В.9. *Гулевич А. И., Киреев А. П.* Производство силовых конденсаторов. М.: Высшая школа, 1981. 284 с.

В.10. *Закгейм Л. Н.* Электролитические конденсаторы. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1963. 284 с.

В.11. *Ануфриев Ю. А., Гусев В. Н., Смирнов В. Ф.* Эксплуатационные характеристики и надежность электрических конденсаторов. М.: Энергия, 1976. 225 с.

В.12. *Ермуратский В. В., Ермуратский П. В.* Конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях. М.: Энергия, 1979. 224 с.

В.13. *Незнайко А. П., Геликман Б. Ю.* Конденсаторы и резисторы. М.: Энергия, 1974. 111 с.

В.14. *Незнайко А. П.* Новые типы конденсаторов. Л.: Энергия, 1970. 47 с.

В.15. *Михайлов И. В., Пропошин А. И.* Конденсаторы. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1973. 55 с.

В.16. Стеклоэмалевые и стеклокерамические конденсаторы / *В. Д. Пономаренко,*

Р. А. Роздова, Р. Г. Айнштейн, Г. Л. Горячева. М.: Энергия, 1972. 160 с.
В.17. *Богородицкий Н. П., Гедзюн В. А., Мандрыка И. А.* Высоковольтные керамические конденсаторы. М.: Советское радио, 1970. 207 с.
В.18. *Торощин П. А.* Металлобумажные конденсаторы. М.—Л.: Энергия, 1965. 213 с.
В.19. *Грибовский П. О., Терентьева Т. И.* Миниатюрные керамические конденсаторы. М.—Л.: Энергия, **1966. 144 с.**
В.20. *Аршанский М. Е.* Керамические конденсаторы малой реактивной мощности. М.: Госэнергоиздат, 1953. 112 с.
В.21. *Звенигородский И. С.* Конденсаторы связи и отбора мощности. М.: Энергия, 1969. 65 с.
В.22. *Азарх С. Х.* Конденсаторы переменной емкости. М.—Л.: Энергия, 1965. 327 с.
В.23. *Дэммер Дж., Норденберг Г. М.* Конденсаторы постоянной и переменной емкости. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1963. 313 с.
В.24. *Тареев Б. М., Лернер М. М.* Оксидная изоляция. Изд. 2-е, перераб. М.: Энергия, 1975. 207 с.
В.25. *Лернер М. М.* Конденсаторы на основе оксидной изоляции / Науч. ред. Б. М. Тареев. М.: ВИНИТИ, 1973. 180 с.
В.26. *Лернер М. М.* Выбор конденсаторов для электронных устройств. М.: Энергия, 1970. 152 с.
В.27. *Варшавский Д. С.* Силовые конденсаторы.— Итоги науки и техники. Сер. Электротехнические материалы, электрические конденсаторы, провода и кабели, 1980, т. 7. 128 с.
В.28. *Варшавский Д. С., Шейнессон Л. С.* Тепловые характеристики силовых конденсаторов наружной установки и конденсаторных батарей. М.: Информэлектро, 1974. 71 с.
В.29. *Варшавский Д. С.* Электрическая прочность и срок службы силовых конденсаторов переменного тока. М.: Информэлектро, 1975. 81 с.
В.30. Вопросы качества радиодеталей / *Б. Ю. Геликман, Г. А. Горячева, Л. Л. Кристаллинский, В. В. Стальбовский.* М.: Советское радио, 1980. 328 с.
В.31. *Буц В. Т., Железнов М. Т., Юринов М. М.* Вакуумные конденсаторы. Л.: Энергия, 1971. 136 с.
В.32. *Карпихин В. В.* Производство радиоконденсаторов постоянной емкости. М.: Высшая школа, 1977. 184 с.
В.33. Варконды в электронных импульсных схемах / *В. Ю. Булыбенко, Т. Н. Вербицкая, В. Ф. Анципарович* и др. М.: Советское радио, 1971. 271 с.
В.34. Включение и отключение батарей конденсаторов / Под. ред. Ю. И. Лыскова. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1961. 128 с.
В.35. *Берковский А. М., Лысков Ю. И.* Мощные конденсаторные батареи (шунтовые). М.: Энергия, 1967. 168 с.
В.36. *Ильяшов В. П.* Конденсаторные установки промышленных предприятий. М.: Энергия, 1972. 248 с.
В.37. *Новодворец Л. А.* Испытание силовых конденсаторных установок. М.: Энергия, 1971. 64 с.
В.38. *Морозов М. М.* Высоковольтные конденсаторы. М.: ВНИИЭМ, 1965. 22 с.
В.39. Силовое конденсаторостроение. М.: Информстандартэлектро, 1968, вып. 1. 140 с.
В.40. Некоторые вопросы силового конденсаторостроения. М.: Информстандартэлектро, 1967. 84 с.
В.41. Конденсаторы при несинусоидальных напряжениях. Кишинев: Штиница, 1977. 100 с.
В.42. Применение конденсаторов в электронных и электротехнических установках. Кишинев: Штиница, 1979. 87 с.
В.43. *Одынец Л. Л.* Физика оксидных пленок. Ч. 1. Петрозаводск: изд. Петрозаводского ун-та, 1979. 80 с.
В.44. *Казарновский Д. М., Тареев Б. М.* Испытания электроизоляционных материалов. Изд. 3-е, перераб. Л.: Энергия, 1980. 214 с.
В.45. Электрические свойства полимеров / Под ред. Б. И. Сажина. Л.: Химия, 1977. 192 с.

Глава 2

2.1. Теория диэлектриков / *Н. П. Богородицкий, Ю. М. Волокобинский, А. А. Воробьев, Б. М. Тареев.* М.: Энергия, 1965. 344 с.
2.2. *Тареев Б. М.* Физика диэлектрических материалов. М.: Энергия, 1973, с. 328.
2.3. *Борисова М. Э., Койков С. Н.* Физика диэлектриков. Л.: Изд-во ЛГУ, 1979. 240 с.
2.4. *Казарновский Д. М.* Потери в обкладках конденсаторов при колебательном разряде.— Изв. вузов. Энергетика, 1966, №8, с. 28—33.
2.5. *Конотоп В. В.* Определение потерь в обкладках высоковольтных импульсных конденсаторов.— Изв. вузов. Энергетика, 1969, № 11, с. 19—22.
2.6. *Кременецкий И. И., Чеботарев Ю. Н.* Особенности работы конденсаторов с металлизированными обкладками в формирующих цепных схемах.— Электронная техника. Сер. 8. Радиодетали, 1969, вып. 4 (17), с. 23—37.
2.7. *Усьяров О. Г., Левин Б. И.* Активное эквивалентное сопротивление конденсатора, работающего в импульсном режиме.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали, 1973, вып. 1 (30), с. 77—89.
2.8. *Нетушил А. В., Ермуратский П. В.* Об учете сопротивления обкладок конденсатора.— Электричество, 1980, № 9, с. 70—71.
2.9. *Варшавский Д. С., Лангваген Е. Н.* Расчет максимального нагрева корпуса электрического конденсатора переменного тока.— Электротехническая промышленность, 1966, вып. 268, с. 14—16.
2.10. *Варшавский Д. С.* Перегрузочная способность конденсаторов повышенной частоты.— В кн.: Частота промышленного тока и проблемы ее оптимизации. Кишинев: РИО АН МССР, 1969, с. 155—161.
2.11. *Переселенцев И. Ф., Гинзбург Е. Л.* Работа пропитанного бумажного диэлектрика при критических частичных разря-

дах.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1975, вып. 10 (54), с. 10—12.
2.12. *Kutchinsky G. S., Kaplan D. A., Pintal Y. S.* a. o. Partaal dischrges and service life of capacitor insulation.— CIGRE, 1966, rep. N 137.
2.13. *Пинталь Ю. С.* Ионизационные характеристики и старение бумажно-масляной изоляции.— Электротехника, 1965, № 1, с. 58—60.
2.14. *Переселенцев И. Ф., Проскурин В. Н.* Частичные заряды в диэлектрике силовых бумажных конденсаторов.— В кн.: Силовое конденсаторостроение, вып. 1. М.: Информстандартэлектро, 1968, с. 52—72.
2.15. *Кучинский Г. С., Ойдрам Р. А.* Влияние термовакуумной обработки на характеристики частичных разрядов и срок службы изоляции силовых конденсаторов.— Электротехническая промышленность. Электротехнические материалы, 1972, вып. 4, с. 8—9.
2.16. *Кучинский Г. С., Лысаковский Г. Г.* Влияние проводимости и вязкости пропитывающего состава на характеристики частичных разрядов при постоянном напряжении в бумажно-масляной изоляции.—Электричество, 1966, № 11, с. 41—45.
2.17. *Bauman M.* Der Selbstheileffekt in Metallisierth Kunstoffkondensatoren.— Bauelemente der Elektrotechnik, 1777, Bd. 12, N 3, S. 42, 44—46, 48, 50.
2.18. *Канин В. А., Огнев Г. К.* Ограничение энергии самовосстановления, выделяемой в зоне пробоя диэлектрика энергоемких конденсаторов с металлизированными обкладками.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1978, вып. 4 (29), с. 27—32.
2.19. *Чатинян Ю. С., Сараджев В. А., Курцян Э. В.* Электрические характеристики явления самовосстановления конденсаторов с металлизированными обкладками.— В кн.: Научные труды Ереванского политехнического ин-та. Электротехника, 1978, т. 4, с. 157—167.

Глава 3

3.1. Справочник по электротехническим материалам. Т. 1 / Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. М.: Энергия, 1974. 583 с.
3.2. Электрорадиоматериалы / *Б. М. Тареев, Н. В. Короткова, В. М. Петров, Л. А. Преображенский.* М.: Высшая школа, 1978. 336 с.
3.3. *Назаров Н. И.* Некоторые свойства материалов силового конденсаторостроения.— В кн.: Семнадцатая научно-техническая конференция МИРЭА (октябрь 1967 г.). Тезисы докладов. М., 1967. 141 с.
3.4. *Fabre Z., Pichon A.* Deteriorating processes and products of paper in oil. Application to transformer.— CIGRE, 1960, Rap. 137.
3.5. *Вахтель И. И., Одинцова М. М.* Конструктивные особенности и основные свойства низковольтных конденсаторов с комбинированным диэлектриком и металлизированными обкладками.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1978, вып. 3 (28), с. 28—33.
3.6. *Степина К. И., Сидорова Л. В., Пруцких Н. А.* Конструктивные особенности и основные свойства низковольтных полиэтилентерефталатных конденсаторов.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали, 1973, вып. 1 (30), с. 3—10.
3.7. *Демиденко Г. Р., Кравчинская Е. Б., Ушанова В. А.* Поликарбонатные конденсаторы.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали, 1973, вып. 1 (30), с. 11—18.
3.8. *Аснин М. М., Чеснова М. К.* Новое в конструировании полистирольных конденсаторов с металлизированными обкладками.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали, 1973, вып. 1 (30), с. 19—28.
3.9. *Вахтель Н. И., Кравчинская Е. Б., Литманович Л. Е.* Пленочные конденсаторы К72-9 и К72-11 на основе фторопласта-4.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали, 1973, вып. 1 (30), с. 29—37.
3.10. *Северюхина Н. В.* Некоторые особенности конструирования лакопленочных конденсаторов.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали, 1973, вып. 1 (30), с. 39—48.
3.11. *Степина К. И.* Новые полиэтилентерефталатные конденсаторы.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1978, вып. 3 (28), с. 14—22.
3.12. *Демиденко Г. Р., Ткаченко Н. В.* Низковольтные поликарбонатные конденсаторы.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1978, вып. 3 (28), с. 34—39.
3.13. *Демиденко Г. Р., Стороженко Е. К.* Малогабаритные полистирольные конденсаторы с улучшенными электрическими и эксплуатационными характеристиками.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1978, вып. 3 (28), с. 40—44.
3.14. *Чеснова М. К.* Конденсаторы на основе нового высокочастотного диэлектрика полипропиленовой пленки.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1978, вып. 3 (28), с. 45—52.
3.15. *Карабанов В. И.* Состояние и перспективы развития конденсаторов с органическим диэлектриком.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1978, вып. 3 (28), с. 3—13.
3.16. *Северюхина Н. В.* Ближайшие перспективы развития лакопленочных конденсаторов.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1978, вып. 3 (28), с. 23—27.
3.17. *Карабанов В. И., Беленький Б. П.* Основные направления развития современных высоковольтных конденсаторов с органическим диэлектриком.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1978, вып. 3 (28), с. 50—59.
3.18. *Беленький Б. П., Новопашенная И. В.* Новое конструктивное решение высоковольтных конденсаторов.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1978, вып. 3 (28), с. 60—64.
3.19. *Фельдман Т. Л., Каменчик Г. А.* Пути создания конденсаторов на напряжение порядка сотен киловольт.— Электронная

техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1978, вып. 3 (28), с. 65—71.
3.20. *Беленький Б. П., Балан Г. Н.* Искусственные формирующие линии с использованием собственной индуктивности конденсаторных секций.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1978, вып. 3 (28), с. 72—78.

Глава 4

4.1. *Эпштейн С. Л.* Характеристики приборов для измерения основных электрических параметров конденсаторов.— М., 1975, вып. 1 (289). 96 с.
4.2. *Эпштейн С. Л.* Характеристики приборов для измерения основных электрических параметров конденсаторов и диэлектриков.— М., 1977, вып. 1 (443). 187 с.
4.3. *Тареев Б. М.* Расчет термокомпенсированных систем конденсаторов.— Электричество, 1974, № 7, с. 41—44.
4.4. *Тареев Б. М.* К вопросу об оценке управляемых параметров материалов и компонентов.— Электричество, 1976, № 9, с. 54—56.
4.5. *Эпштейн С. Л.* Измерение характеристик конденсаторов. Емкость и тангенс угла потерь. М.—Л.: Энергия, 1965. 236 с.
4.6. *Эпштейн С. Л.* Измерение характеристик конденсаторов. Изд. 2-е, доп. и перераб. Л.: Энергия, 1971. 220 с.
4.7. *Оболончик И. Б., Старусева С. Ф., Моисеева Н. Л.* Двухячеечная модель при описании конденсаторов с абсорбцией.— В кн.: Вестник Харьковского политехнического ин-та, № 143. Электроэнергетика и автоматизация энергоустановок, вып. 6. Харьков: Вища школа, 1978, с. 66—69.
4.8. *Оболончик И. Б., Старусева С. Ф.* Саморазряд многоячеечной модели конденсатора с абсорбцией.— В кн.: Вестник Харьковского политехнического ин-та, № 169. Электроэнергетика и автоматизация энергоустановок, вып. 8. Харьков: Вища школа, 1980, с. 67—69.
4.9. *Ермуратский В. В., Ермуратский П. В.* Определение параметров схем замещения диэлектриков и расчет потерь при несинусоидальном напряжении.— Электричество, 1975, № 11, с. 73—75.
4.10. *Голубь С. Г.* Некоторые свойства фторопластовых конденсаторов типа ФТ.— Электронная техника. Сер. 8. Радиодетали, 1969, вып. 2 (15), с. 65—70.
4.11. *Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. М.* Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 360 с.
4.12. *Гураевский М. И.* Особенности применения конденсаторов в тиристорных преобразователях энергии.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1977, вып. 4 (23), с. 17—28.
4.13. Kondensatoren für die Energie—Elektronik.— Siemens Aktiengesellschaft Datenbuch, 1979/80. S. 548.
4.14. *Богородицкий Н. П., Фридберг И. Д.* Электрические основы высокочастотной керамики. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1958. 192 с.
4.15. *Балыгин И. Е.* Электрические свойства твердых тел. Л.: Энергия, 1974. 188 с.
4.16. *Балыгин И. Е.* Электрическая прочность жидких диэлектриков. М.—Л.: Энергия, 1964. 227 с.
4.17. *Menkart G. R., Waldon P. L.* New S×T Formyla uses Temperature and Voltage as key to Longer life Capacitors.— CIGRE, 1964, S1/58.
4.18. *Варшавский Д. С.* Пути повышения качества силовых конденсаторов. М., 1963. 216 с.
4.19. *Варшавский Д. С.* Срок службы комбинированной конденсаторной изоляции на переменном токе.— В кн.: Труды XI научно-технической конференции УКСДИ. Усть-Каменогорск, 1971, с. 38—39.
4.20. *Кучинский Г. С., Литвинова Е. Л., Морозов Е. А.* Импульсные конденсаторы с пленочно-бумажным диэлектриком.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1973, вып. 1 (21), с. 27—30.
4.21. *Renne V. T.* Specifik Characterictics of Capacitors Electronic Components., 1970, v. 11, N 8, p. 895—898.
4.22. *Козлов Б. А., Ушаков И. А.* Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Советское радио, 1975. 471 с.
4.23. *Дущенко В. К.* Применяемость типовых элементов радиоэлектронной аппаратуры. М.: Советское радио, 1971. 97 с.
4.24. *Гусев В. Н., Смирнов В. Ф.* Электрические конденсаторы постоянной емкости. М.: Советское радио, 1968. 87 с.
4.25. *Дружинин Г. В., Степанов С. В., Шихматова В. Л.* и др. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах. М.: Энергия, 1976. 448 с.

Раздел II. ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

Глава 5. Расчет электрических и тепловых режимов конденсаторов

§ 5.1. Общие сведения об электрических и тепловых режимах работы конденсаторов

Виды электрических нагрузок конденсаторов. На рис. 5.1.1 приведено классификационное дерево напряжений, воздействующих на конденсаторы по такому признаку, как форма.

Под *переменным* понимается напряжение, мгновенное значение которого изменяется во времени.

У переменного напряжения различают *переменную* и *постоянную* составляющие. Последняя представляет собой среднее за период значение мгновенного напряжения. Переменное напряжение может не содержать постоянную составляющую (см. рис. 5.1.1).

Переменные составляющие напряжения могут быть *синусоидальными* и *несинусоидальными*. Первые являются моногармоническими, вторые — полигармоническими колебаниями. В свою очередь несинусоидальные напряжения делятся на напряжения *типовой* (простой) и *произвольной* (сложной) форм.

Примеры напряжений типовых форм приведены на рис. 5.1.2. Это напряжения трапецеидальной формы с косинусоидальными (рис. 5.1.2, *а*) и линейными (5.1.2, *б*, *в*) фронтами, а также частные случаи, получаемые из трапецеидальных форм путем изменения параметров данных напряжений. Например, при длительности вершины $t_{в1}=0$ из напряжения вида, показанного на рис. 5.1.2, *а*, получается напряжение

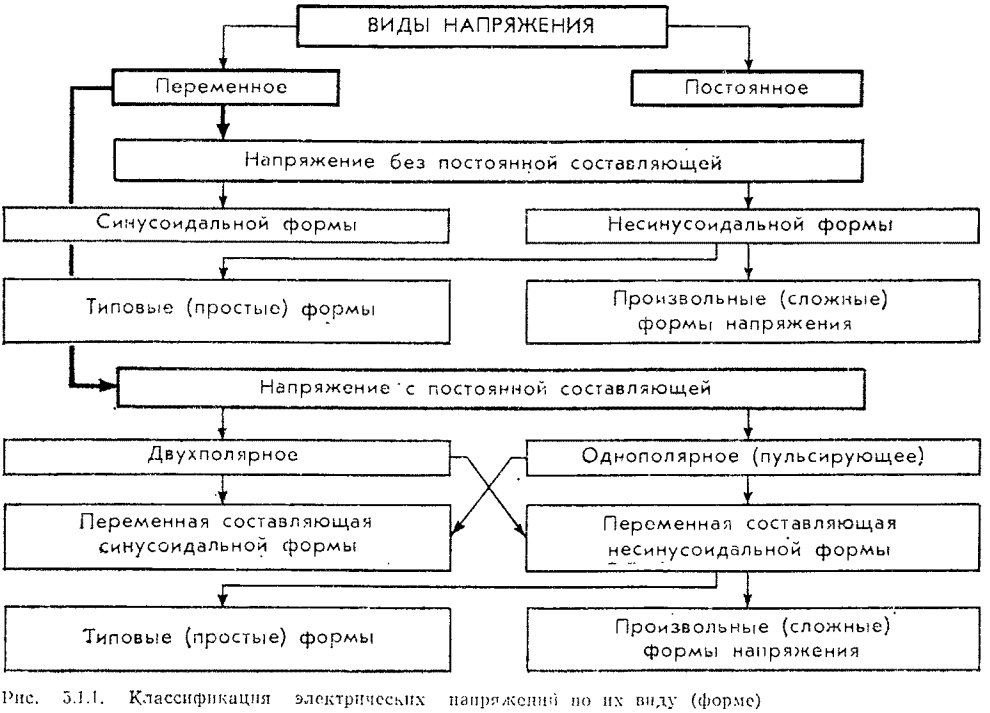


Рис. 5.1.1. Классификация электрических напряжений по их виду (форме)

так называемой гребенчатой формы с косинусоидальными фронтами (рис. 5.1.2, *г*). Аналогично, придавая вершинам значения $t_{в1}=t_{в2}=0$ из рис. 5.1.2, *б*, можно получить при $t_{ф1}=t_{ф2}$ треугольное, а при $t_{ф1} \gg t_{ф2}$ — пилообразное напряжение и т. д. Эти напряжения могут быть с экспоненциальными, или комбинированными фронтами.

Реальные напряжения на конденсаторах обычно имеют более сложную форму, чем показанные на рис. 5.1.2, однако часто их идеализируют, сводя к типовым.

Напряжение произвольной формы по сравнению с типовой характеризуется бо́льшим числом параметров. Примером такой формы служит напряжение на конденсаторах фильтров переменного тока, вид которого зависит от амплитуд и фаз отдельных гармонических составляющих.

Хотя напряжение произвольной формы не может быть сведено к типовой, однако и в этих случаях используется некоторая идеализация формы напряжения, например, его кусочно-линейная или кусочно-постоянная аппроксимация.

Дальнейшее деление видов напряжений, воздействующих на конденсаторы, основано на признаке периодичности.

Напряжения могут быть *периодическими* и *непериодическими*, т. е. с изменяющимся во времени периодом.

При наличии постоянной составляющей в кривой напряжения на конденсаторе различают *однополярное* (или *пульсирующее*) напряжение, при котором знак зарядов на обкладках (или полярность напряжения на выводах конденсатора) не изменяется, и *двухполярное*.

Наряду с синусоидальным (или близким к синусоидальному) напряжением (или током) широко распространены на практике несинусоидальные напряжения (или токи), имеющие *импульсный* характер, при котором ток через конденсатор или напряжение на нем представляет собой импульсы, имеющие малую по сравнению с периодом повторения этих импульсов длительность.

Форма импульсов тока и напряжения конденсатора зависит от принципа действия устройства, схемы и параметров цепи, в которую включен конденсатор. Она может быть близка к прямоугольной, к полуволне синусоиды, к затухающей синусоидальной волне, к экспоненте, а также может быть более сложной, состоящей из нескольких различных участков.

Для конденсаторов ряда устройств характерен так называемый *накопительный* режим работы, при котором они в течение относительно большого промежутка времени заряжаются—отдают накопленную энергию в цепь нагрузки.

Разряд конденсатора на *RL*-нагрузку может быть *апериодическим*, при котором энергия конденсатора за все время переходного процесса непрерывно убывает (рис. 5.1.3, *а*), *затухающим колебательным*, при котором мгновенное значение энергии конденсатора колеблется, а среднее—убывает (рис. 5.1.3, *б*), и *критическим*, являющимся граничным между апериодическим и колебательным разрядами. Вид кривых, характеризующих критический разряд, аналогичен кривым рис. 5.1.3, *а*.

По глубине разряд конденсатора может быть *неполным* (при этом напряжение на нем уменьшается на некоторую величину), *полным*, при котором напряжение уменьшается до нуля, а также *разряд с изменением полярности* напряжения на конденсаторе, как это, например, имеет место в случае колебательного разряда.

При импульсном режиме работы конденсатор может работать в режиме *одиночных импульсов* или в режиме *пачек импульсов*. В последнем случае после серии из некоторого числа импульсов насту-

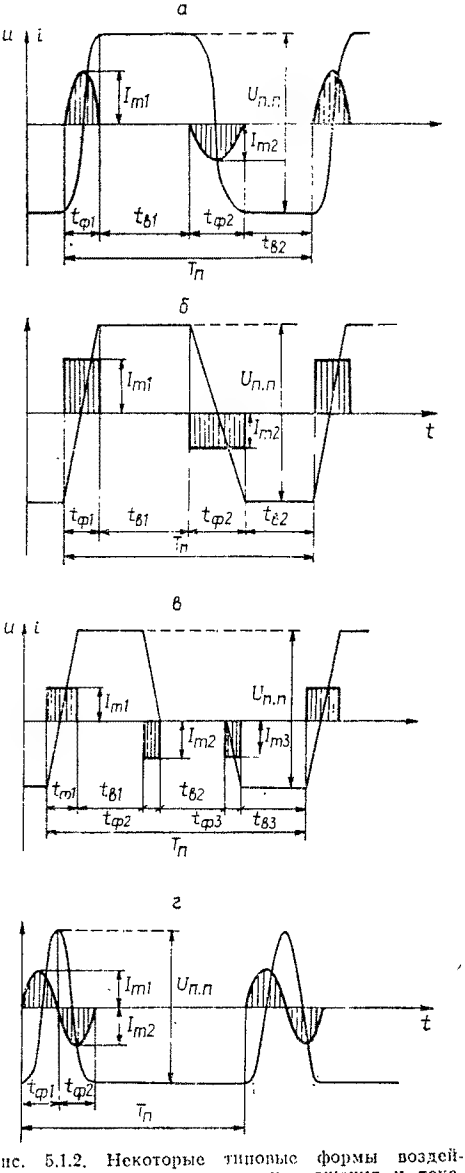


Рис. 5.1.2. Некоторые типовые формы воздействующего на конденсаторы напряжения и тока

пает более или менее продолжительная пауза, во время которой импульсы тока отсутствуют, после чего процесс повторяется.

На практике различают режимы одиночных и пачек *видеоимпульсов* и *радиоимпульсов* (рис. 5.1.4, *а*, *б*). Последние представляют собой пакеты синусоидальных колебаний.

Видеоимпульсы могут представлять собой напряжения типовой (трапецеидальные, треугольные, пилообразные, гребенчатые формы) и произвольной форм.

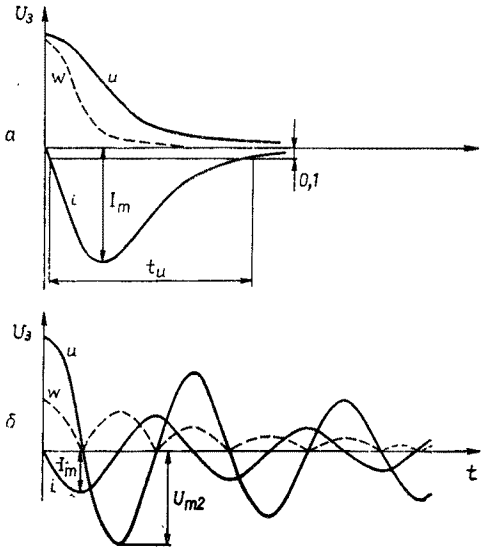


Рис. 5.1.3. Изменение тока, напряжения и энергии во времени при апериодическом (*а*) и колебательном (*б*) разрядах конденсатора: w, u, i — мгновенная энергия, напряжение и ток конденсатора; $U_з$ — напряжение зарядки

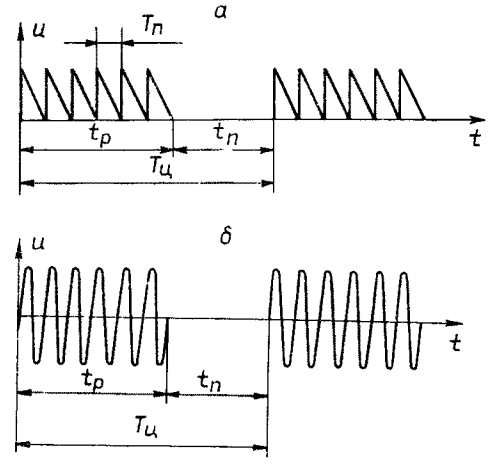


Рис. 5.1.4. Пачки пилообразных видеоимпульсов (*а*) и радиоимпульсов (*б*)

Основные параметры несинусоидального напряжения и тока. Пример кривой периодического несинусоидального напряжения показан на рис. 5.1.5. На практике такие напряжения представляют собой непрерывные функции времени, имеющие ограниченные производные, однако для упрощения расчетов часто оказывается удобным рассматривать некоторые участки кривой напряжения как разрывы первого рода (моменты времени t_1, t_2, t_3 на рис. 5.1.5).

Мгновенные значения напряжения u или тока i—текущие значения этих величин в каждый момент времени.

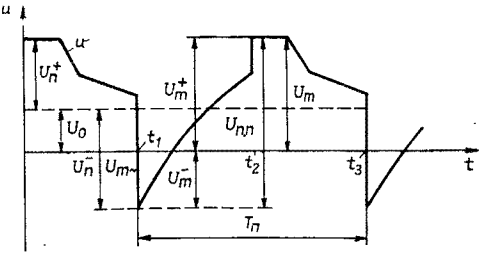


Рис. 5.1.5. Пример периодического несинусоидального напряжения

Периодом $T_п$ напряжения u называется наименьший промежуток времени, через который повторяются все значения напряжения. В связи с этим промежуток называют также периодом повторения, т. е.

$$u(T_п + t) = u(t). \qquad (5.1.1)$$

Величина, обратная периоду повторения $f_п = \frac{1}{T_п}$, называется *частотой повторения* (или *частотой следования*).

Помимо мгновенного значения напряжения u различают его *среднее* за период значение, или, что то же самое, *постоянную составляющую* несинусоидального напряжения

$$U_0 = \frac{1}{T_п}\int_0^{T_п} u\,dt, \qquad (5.1.2)$$

***амплитуду*, или максимальное по модулю значение**

$$U_m = \max\left\{U_m^+, \left|U_m^-\right|\right\}, \qquad (5.1.3)$$

полный размах от пика до пика

$$U_{п.п} = U_m^+ + \left|U_m^-\right|, \qquad (5.1.4)$$

где U_m^+, U_m^- —максимальные значения мгновенного напряжения положительной и отрицательной полярности. Для пульсирующего напряжения величина $U_{п.п} = U_{max} - U_{min}$, где U_{max} и U_{min}—максимальное и минимальное (по модулю) значения мгновенного напряжения.

Амплитуда переменной составляющей напряжения $U_m{\sim} = \max\{u - U_0\}$.

Пиковые (максимальные) положительные и отрицательные значения переменной составляющей $U_п^+$ и $U_п^-$.

Действующее значение несинусоидального напряжения

$$U = \sqrt{\frac{1}{T_\text{п}} \int_{t}^{t+T_\text{п}} u^2 dt} \qquad (5.1.5)$$

и его переменной составляющей

$$U_\sim = \sqrt{\frac{1}{T_\text{п}} \int_{t}^{t+T_\text{п}} u_\sim^2 \, dt} \, . \qquad (5.1.6)$$

Величина $U^2 = U_\sim^2 + U_0^2$, а $u = U_0 + u_\sim$, где $u_\sim$ — мгновенное значение переменной составляющей напряжения.

Пульсирующее (однополярное переменное) напряжение характеризуется коэффициентом пульсаций $k_\text{п} = \frac{U_{m1}}{U_0}$, где U_{m1} — амплитуда первой гармоники пульсации (коэффициент пульсаций можно определить так же, как отношение $U_\text{п.п}/U_0$). В технических условиях на конденсаторы обычно предполагается, что переменная составляющая пульсирующего напряжения имеет синусоидальную форму.

Для видеоимпульса (рис. 5.1.6) можно выделить передний фронт и его длительность $t_{\text{ф}1}$, вершину импульса, ее длительность $t_{\text{в}1}$ и спад вершины $\Delta U_\text{в}$, задний фронт и его длительность $t_{\text{ф}2}$, а также паузу $t_\text{п} = t_{\text{в}2}$, которую также можно рассматривать как вторую вершину.

Очевидно, сумма всех этих вершин при четких границах между фронтами и вершинами равна периоду повторения:

$$t_{\text{ф}1} + t_{\text{ф}2} + t_{\text{в}1} + t_{\text{в}2} = T_\text{п}. \qquad (5.1.7)$$

Определение временных параметров импульсов напряжения не вызывает трудностей в случае четкого деления осциллограммы на участки фронтов и вершин. При нечетких границах между ними на полном размахе выделяются значения, соответствующие 10 и 90% от $U_\text{п.п}$, и за длительность фронта принимается промежуток времени, за который напряжение изменяется от 10 до 90% $U_\text{п.п}$ (рис. 5.1.6).

Отношение периода повторения $T_\text{п}$ к длительности импульса $t_\text{п}$ называется *скважностью*

$$q = \frac{T_\text{п}}{t_\text{п}}. \qquad (5.1.8)$$

Эта величина определяет соотношение между параметрами импульса и средними за период значениями тока, напряжение мощности и т. п.

Часто через конденсаторы протекает импульсный ток, начало и конец которого четко фиксируются включением и выключением коммутирующих элементов. Этим определяется длительность протекания тока $t_\text{п}$, равная длительности фронта напряжения на конденсаторе (см. рис. 5.1.2). При нечетких границах за длительность импульса принимается его продолжительность на уровне 0,1 или 0,5 (см. рис. 5.1.6).

Для коротких импульсов тока вводится понятие *энергетической длительности импульса* тока $\tau_\text{э}$, необходимое для оценки импульсной тепловой устойчивости конденсаторов. Это длительность прямоугольного импульса тока, имеющего ту же амплитуду и действующее значение, что и реальный импульс длительности $t_\text{п}$:

$$\tau_\text{э} = \frac{1}{I_m^2} \int_0^{t_\text{п}} i^2 dt. \qquad (5.1.9)$$

Для импульса тока прямоугольной формы $\tau_\text{э} = t_\text{п}$. При токе, имеющем форму

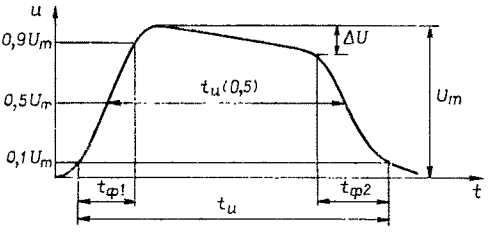


Рис. 5.1.6. Величины, характеризующие видеоимпульс: U_m — амплитуда импульса; $t_\text{и}$ — длительность импульса на уровне 0,1 U_m; $t_\text{и}(0,5)$ — длительность импульса на уровне 0,5 U_m

половины волны синусоиды (см. рис. 5.1.2), $\tau_\text{э} = \frac{t_\text{и}}{2}$. При экспоненциальной форме тока и условии, что $t_\text{ф}^2 \geqslant 3\tau$, $\tau_\text{э} = \frac{\tau}{2}$, где τ — постоянная времени экспоненты.

Энергетическая длительность импульса тока при апериодическом и колебательном разрядах конденсатора приближенно равна $I_\text{и}^2 \, t_\text{и}/I_m^2$, где величины $I_\text{и}$ и I_m рассчитываются по формулам табл. 5.2.1.

В случае колебательного разряда скорость затухания колебаний характеризуют *декремент* (убыль) колебаний Δ, равный отношению двух мгновенных значений напряжения или тока в моменты времени t и $t + T_\text{р}$, где $T_\text{р} = 2\pi \sqrt{1/LC - \delta_\text{р}^2}$ — период колебаний при разряде (рис. 5.1.3, *б*); $\Delta = e^{\delta_\text{р} T_\text{р}}$, где $\delta_\text{р} = \frac{r}{2L}$ — коэффициент затухания; r — активное сопротивление цепи; L — индуктивность цепи.

Логарифмический декремент колебаний Д составляет $\text{Д} = \ln\Delta = \frac{\pi r}{\sqrt{\rho^2 - \frac{r^2}{4}}}$, где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$.

Кроме вышеуказанных характеристик импульсные напряжения, токи и их последовательности в ТУ определяются рядом терминов и понятий, разъясняющих режимы нагружения.

Глубина разряда (в ТУ — глубина частичного разряда) характеризует изменение

Таблица 5.1.1

Форма напряжения на рисунке	Параметры формы напряжения	$U_к$	$I_к$	Значения k
5.1.2,*б*	$t_{ф1}=t_{ф2}=t_ф$ $t_{в1}=t_{в2}$	$\dfrac{2U_{п.п}\cos\dfrac{k\pi t_ф}{T_п}}{\pi k[1-k^2(2t_ф/T_п)^2]}$	$\dfrac{8I_m\,t_ф/T_п\cos\dfrac{k\pi t_ф}{T_п}}{\pi[1-k^2(2t_ф/T_п)^2]}$	1,3,5...
	$t_{ф1}=t_{ф2}=t_ф$ $t_{в1}<t_{в2}$	$\dfrac{2U_{п.п}\cos\dfrac{k\pi t_ф}{T_п}\times\sin\dfrac{k\pi(t_{в1}+t_ф)}{T_п}}{\pi k[1-k^2(2t_ф/T_п)^2]}$	$\dfrac{8I_m\,t_ф/T_п\cos\dfrac{k\pi t_ф}{T_п}\times\sin\dfrac{k\pi(t_{в1}+t_ф)}{T_п}}{\pi[1-k^2(2t_ф/T_п)^2]}$	1,2,3...
5.1.2,*г*	$t_{ф1}=t_{ф2}=t_ф$ $t_{в1}=0$	$\dfrac{U_{п.п}\sin\dfrac{2\pi k t_ф}{T_п}}{\pi k[1-k^2(2t_ф/T_п)^2]}$	$\dfrac{4I_m\,t_ф/T_п\sin\dfrac{2k\pi t_ф}{T_п}}{\pi[1-k^2(2t_ф/T_п)^2]}$	1,2,3...
	$t_{ф1}=t_{ф2}=t_ф$ $t_{в1}=0$	$\dfrac{2U_{п.п}\sin\dfrac{k\pi t_ф}{T_п}}{k^2\pi^2 t_ф/T_п}$	$\dfrac{4I_m}{k\pi}\sin\dfrac{k\pi t_ф}{T_п}$	1,3,5...
5.1.2,*б*	$t_{ф1}=t_{ф2}=t_ф$ $t_{в1}<t_{в2}$	$\dfrac{2U_{п.п}\sin\dfrac{k\pi t_ф}{T_п}\times\sin\dfrac{k\pi(t_{в1}+t_ф)}{T_п}}{k^2\pi^2 t_ф/T_п}$	$\dfrac{4I_m}{k\pi}\sin\dfrac{k\pi t_ф}{T_п}\times\sin\dfrac{k\pi(t_{в1}+t_ф)}{T_п}$	1,2,3...
	$t_{ф1}=t_{ф2}=t_ф$ $t_{в1}=0$	$\dfrac{2U_{п.п}\sin^2\dfrac{k\pi t_ф}{T_п}}{k^2\pi^2 t_ф/T_п}$	$\dfrac{4I_m\sin^2\dfrac{k\pi t_ф}{T_п}}{k\pi}$	1,2,3...
	$t_{ф1}>t_{ф2}=t_ф$ $t_{в1}=t_{в2}=0$	$\dfrac{U_{п.п}\,T_п^2\sin\dfrac{k\pi t_ф}{T_п}}{\pi^2k^2(T_п-t_ф)t_ф}$	$\dfrac{2I_mT_п\sin\dfrac{k\pi t_ф}{T_п}}{k\pi(T_п-t_ф)}$	1,3,5,9...
5.1.2,*в*	$t_{ф1}=t_{ф2}=t_{ф3}=t_ф$ $t_{в1}=t_{в2}=t_{в3}=$ $=T_п/3-t_ф$	$\dfrac{3U_{п.п}\sin\dfrac{k\pi t_ф}{T_п}}{2k^2\pi^2\,t_ф/T_п}$	$\dfrac{3I_m\sin\dfrac{k\pi t_ф}{T_п}}{\pi k}$	1,2,4,5,7,8,10...

напряжения на конденсаторе при его неполном разряде. Численно глубина разряда может быть выражена в абсолютных ($\Delta U=U_{max}-U_{min}$), относительных $\left(\Delta U^*=\dfrac{U_{max}-U_{min}}{U_{max}}\right)$ значениях или в процентах ($\Delta U=\Delta U^*\cdot 100\%$). Обычно за U_{max} принимается номинальное напряжение конденсатора, или максимальное напряжение зарядки. *Время полного разряда* (длительность разряда) — продолжительность разряда конденсатора от номинального напряжения $U_н$ до уровня 0,1 $U_п$.

Длительность импульса напряжения—продолжительность импульса напряжения на уровне 0,1 или 0,5 $U_н$.

Интервал между включениями конденсатора под электрическую нагрузку—промежуток времени, в течение которого электрическое напряжение не прикладывается к конденсатору.

Время зарядки—промежуток времени, за который напряжение на конденсаторе нарастает от уровня 0,1 $U_н$ до уровня 0,9 $U_н$.

Время непрерывной работы—интервал, во время которого на конденсатор воздействует периодическая последовательность импульсов. Иначе говоря, это продолжительность пачки импульсов.

Время отдыха (или пауза) между сериями импульсов — интервал времени, в течение которого на конденсатор в прерывистых режимах работы в промежутке между пачками не воздействует электрическое напряжение.

Время ожидания—интервал времени, в течение которого между отдельными сериями (пачками) импульсов на конденсатор воздействует постоянное напряжение.

Несинусоидальные напряжения и токи можно характеризовать не только мгновенными, средними и действующими значениями, но и с помощью спектров, представляющих собой множество амплитуд (или действующих значений) гармонических составляющих вместе с их частотами и фазами, получаемых путем разложения кривых u или i в ряд Фурье. В общем случае этот спектр бесконечный, однако на практике оказывается достаточно точным разложение, содержащее ограниченное число наиболее существенных членов ряда. Их количество зависит от конкретной задачи и колеблется в широких пределах: от единиц до нескольких сотен.

В табл. 5.1.1 приведены амплитуды гармоник напряжения и тока для некоторых типовых форм напряжения и тока.

Классификация электрических нагрузок конденсаторов по характеру их воздействия во времени. Классификационное дерево режимов электрического нагружения конденсаторов по этому признаку показано на рис. 5.1.7.

Режимы электрического нагружения конденсаторов делятся на *непрерывные* и *прерывистые, простые* и *сложные, циклические* и *ациклические.*

В *непрерывном* режиме электрического нагружения мгновенное напряжение на конденсаторе всюду отлично от нуля за исключением моментов перехода через нуль. Примерами непрерывного режима электрического нагружения могут служить синусоидальные и несинусоидальные напряжения, длительно воздействующие на конденсатор.

В случае несинусоидальных форм напряжения кривая напряжения в непрерывном режиме электрического нагружения не должна содержать участки, где напряжение равно нулю. При непрерывных нагрузках напряжение приложено к конденсаторам в течение длительного времени. Такой режим характерен для работы конденсаторов в электроэнергетических сетях, мощных высоковольтных преобразователях в системах передачи энергии постоянным током, тиристорных преобразователях частоты и в некоторых других случаях.

В прерывистом режиме электрического нагружения кривая мгновенного напряжения содержит участки, где оно равно нулю. Примерами прерывистого режима электрического нагружения являются импульсные режимы работы конденсаторов, когда на них воздействует последовательность или пачки радио- или видеоимпульсов (рис. 5.1.4).

В таких прерывистых режимах электрического нагружения напряжение прикладывается к конденсаторам в течение некоторого времени (*длительность работы* $t_р$), а затем снимается (*длительность паузы* $t_п$). Если этот процесс носит периодический характер, то такой режим называется *циклическим* $T_ц = t_р + t_п$. В противном случае прерывистый режим является *ациклическим.* Прерывистые режимы работы свойственны конденсаторам электронных устройств, а также для некоторых электротехнических и электротехнологических установок.

Простые режимы электрического нагружения конденсаторов характеризуются постоянством параметров воздействующего напряжения (его значения, частоты, длительность фронтов, скважность, формы и т. д.). К простым режимам электрического нагружения условно можно также отнести случаи, когда параметры напряжения изменяются в относительно небольших пределах.

В *сложном* режиме электрического нагружения параметры воздействующего напряжения (один или несколько) переменны во времени. При этом если параметры переменны во времени по циклическому закону, т. е. их значения повторяются с постоянным периодом (или периодами), то режим электрического нагружения считается *сложным циклическим.* В противном случае имеет место *сложный ациклический* режим.

Примером непрерывного сложного циклического режима электрического нагружения может служить *повторно-периодический* режим, в котором величина напряжения (или другой параметр) периодически ступенчато изменяется на двух уровнях.

Вместе с тем если один из этих уровней равен нулю, т. е. режим электрического нагружения становится прерывистым, то при неизменной форме, частоте и других постоянных параметрах напряжения на ин-

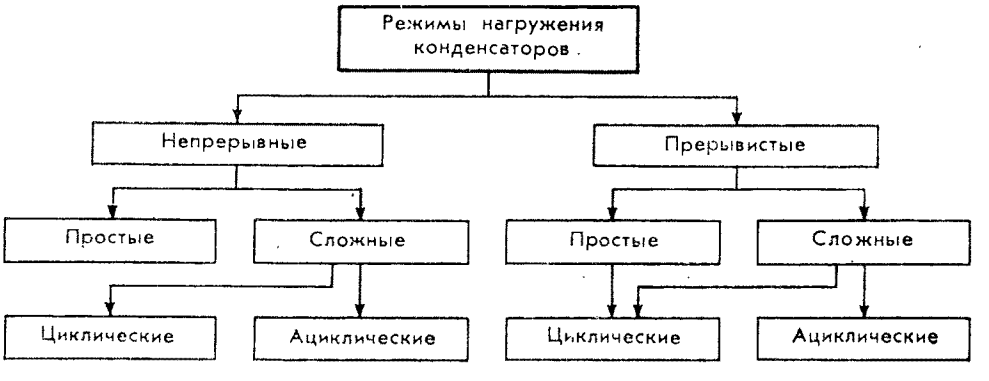


Рис. 5.1.7. Классификация электрических режимов нагружения конденсаторов

тервале нагружения и постоянстве интервалов нагружения и паузы такой режим относится к *прерывистому простому* режиму. Прерывистый простой режим электрического нагружения всегда является циклическим.

Режимы теплового нагружения конденсаторов. Классификация режимов теплового нагружения конденсаторов такая же, как и на рис. 5.1.7.

В *непрерывном* режиме теплового нагружения мгновенная мощность тепловыделения в конденсаторе отлична от нуля на всем рассматриваемом интервале времени (рис. 5.1.8, *б*, *г*).

В *прерывистом* режиме теплового нагружения существуют интервалы времени, на которых мгновенная мощность тепловыделения становится равной нулю (рис. 5.1.8, *е*).

Простой непрерывный режим теплового нагружения характеризуется неизменной во времени мощностью тепловыделения. Такой режим нагружения для большинства видов конденсаторов достижим только путем специального формирования зависимости параметров напряжения во времени, поскольку параметры конденсатора (емкость, tgδ, сопротивление изоляции) зависят от температуры, а в конечном итоге — от мощности тепловыделения.

Наиболее близким к непрерывному простому режиму теплового нагружения является режим конденсаторов с неполярным диэлектриком и фольговыми обкладками в непрерывном простом режиме электрического нагружения.

В *непрерывных сложных* режимах теплового нагружения мгновенная мощность тепловыделения в конденсаторе является переменной во времени. При этом если мощность тепловыделения изменяется во времени по циклическому закону, т. е. ее значение периодически повторяется с постоянным периодом (или периодами), то такой режим нагружения является *сложным циклическим* (рис. 5.1.8, *г*). В противном случае режим нагружения является ациклическим.

Примером *прерывистого простого* режима теплового нагружения может служить периодическая последовательность импульсов мощности тепловыделения с постоянной амплитудой (рис. 5.1.8, *е*). Приближенно можно считать, что прерывистый простой режим теплового нагружения имеет место в случае воздействия на конденсатор пачек импульсов (в прерывистом простом циклическом режиме электрического нагружения).

В *прерывистых сложных* режимах теплового нагружения мощность тепловыделения в конденсаторе принимает нулевые значения во время паузы ($t_п$) и переменные — на интервале работы ($t_р$).

К прерывистому сложному циклическому ($T_ц$=const) режиму теплового нагружения можно также отнести случай, когда амплитуда импульсов мощности постоянна, а продолжительность интервала тепловыделения $t_р$ или паузы $t_п$ изменяется от цикла к циклу при $T_ц$=const.

Если же продолжительность интервала тепловыделения постоянна во времени, а переменной служит продолжительность цикла нагружения ($T_ц$=var), то такой режим является *прерывистым сложным ациклическим*.

Существенно и то, что прерывистый режим электрического нагружения не всегда обуславливает прерывистый режим теплового нагружения конденсатора. Это связано с тем, что в диэлектрике имеют место замедленные виды поляризации (см. § 2.1), сопровождающиеся потерями электрической энергии. Мощность тепловыделения в конденсаторе не равна нулю на интервалах, когда напряжение равно нулю (до тех пор, пока не завершится деполяризация). Таким образом, в циклических режимах электрического нагружения мощность тепловыделения колеблется. Ее среднее значение рассчитывается по формулам § 5.3.

В ряде практических случаев с целью упрощения расчетов принимаются различные допущения. Так, часто считается, что мощность тепловыделения на интервале нагружения ($t_р$) постоянна, т. е. не зависит от развивающейся в конденсаторе температуры.

Тепловые режимы работы конденсаторов. Пространственно-временное распределение температуры различных точек конденсатора, возникающее в результате тепловых воздействий, характеризует его тепловое поле и тепловой режим работы.

Принято различать *внутреннее* и *внешнее* тепловое воздействие [5.1].

Внутреннее тепловое воздействие определяется мощностью и энергией тепловыделения в конденсаторе, характером режима теплового нагружения, а внешнее — ус-

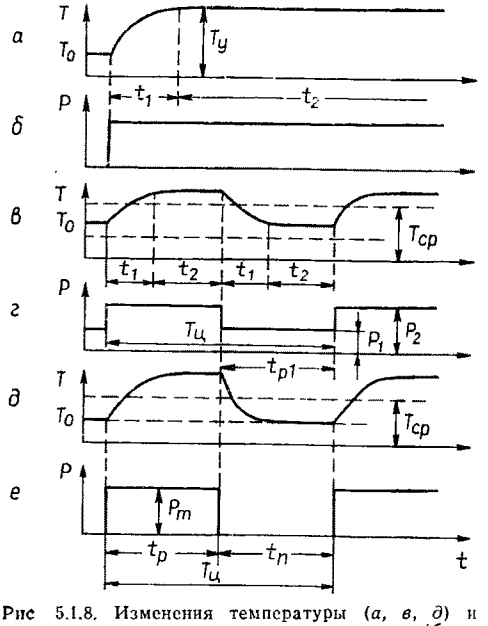


Рис 5.1.8. Изменения температуры (*а*, *в*, *д*) и мощности тепловыделения конденсаторов (*б*, *г*, *е*) в простом непрерывном (*а*, *б*), сложном непрерывном (*в*, *г*) и простом прерывистом (*д*, *е*) режимах теплового нагружения

Таблица 5.1.2

Соотношение	Тепловой режим работы конденсатора
$t_р/\tau_т > 3$; $t_ц/\tau_т > 0$	Длительный
$t_р/\tau_т \leqslant 3$; $t_ц/\tau_т \leqslant 3$	Повторно-кратковременный
$t_р/\tau_т < 3$; $t_ц/\tau_т > 3$	Кратковременный

ловиями охлаждения, а также посторонними источниками тепловой энергии.

В зависимости от режима теплового нагружения тепловое поле конденсатора может быть *стационарным* (рис. 5.1.9, *а*) (когда мгновенная температура всех точек не изменяется во времени), *нестационарным* (рис. 5.1.9, *б*) (когда температура изменяется во времени) и *квазистационарным* (рис. 5.1.9, *в*) (когда при циклическом изменении тепловыделения мгновенная температура изменяется во времени, но средняя за цикл температура постоянна от цикла к циклу).

Основываясь на классификации, принятой для электрических машин и аппаратов, тепловые режимы работы конденсаторов можно разделить на *длительные,* при которых мгновенная температура теплового центра конденсатора за время работы ($t_р$) достигает установившихся значений (рис. 5.1.8, *а*); *повторно-кратковременные,* при которых температура теплового центра конденсатора ни на интервале $t_р$ или t_1, ни на интервале $t_п$ или t_2 не достигает установившихся значений $T_{у\,max}$ и $T_{у\,min}$ (рис. 5.1.10); а также *кратковременные,* при которых за время работы $t_р$ температура теплового центра конденсатора не достигает установившегося значения $T_{у\,max}$, а за время паузы—достигает $T_{у\,min}$ (рис. 5.1.11).

В табл. 5.1.2 приведены соотношения, позволяющие судить о характере теплового режима работы конденсатора в зависимости от соотношения параметров прерывистого режима теплового нагружения и тепловой постоянной времени конденсатора (см. § 4.4). Для непрерывного режима теплового нагружения со ступенчатым изменением мощности на двух уровнях соотношения такие же (при этом $t_р = t_1$, $t_п = t_2$).

Так как характер теплового режима работы конденсатора зависит от соотношения между параметрами режима теплового нагружения и тепловой постоянной времени $\tau_т$, то один и тот же режим нагружения в конденсаторах, имеющих различные $\tau_т$, может приводить к разным тепловым режимам работы конденсатора.

С другой стороны, один и тот же характер теплового режима конденсатора может быть получен при различных режимах теплового нагружения. Так, например, повторно-кратковременный или кратковременный тепловой режим работы конденсатора может иметь место как при прерывистом характере тепловыделения в конденсаторе (рис. 5.1.8, *е*, 5.1.10, *в*, 5.1.11, *б*), так и в непрерывных сложных режимах нагружения, в частности, в случае циклического изменения мощности тепловыделения на двух уровнях (рис. 5.1.8, *г*; 5.1.10, *б*; 5.1.11, *г*).

Кроме деления тепловых режимов по признаку достижения мгновенной температуры установившихся значений их можно классифицировать также по характеру изменения мгновенной и средней за цикл температуры конденсатора.

Различают *стационарный, квазистацио-*

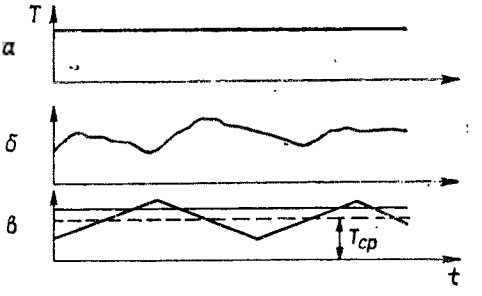


Рис. 5.1.9. Зависимость температуры от времени в стационарном (*а*), нестационарном (*б*) и квазистационарном (*в*) тепловых режимах

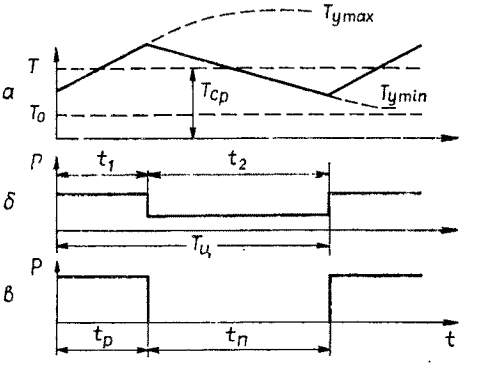


Рис. 5.1.10. Изменение температуры (*а*) конденсатора при повторно-кратковременном тепловом режиме в случае циклического тепловыделения (*б*, *в*)

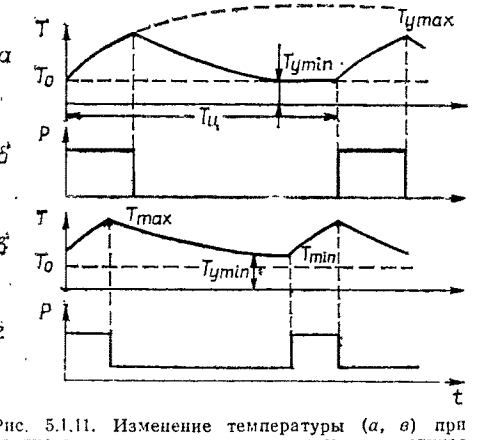


Рис. 5.1.11. Изменение температуры (*а*, *в*) при кратковременном тепловом режиме в случае циклического тепловыделения (*б*, *г*)

нарный и нестационарный тепловые режимы конденсатора.

При стационарном тепловом режиме конденсатора мгновенная температура любой его точки во все моменты времени является постоянной ($T(t)=\text{const}$). Стационарный тепловой режим, строго говоря, достижим только в непрерывном простом режиме теплового нагружения, т. е. при неизменной мощности тепловыделения и неизменных условиях охлаждения и внешних тепловых воздействий после достижения установившегося состояния температурного поля.

Однако в тех случаях, когда тепловая постоянная времени конденсатора существенно больше, чем продолжительность паузы или цикла нагружения, колебания мгновенной температуры при циклическом тепловыделении в конденсаторе становятся настолько незначительными, что приближенно можно считать тепловое поле конденсатора стационарным. В качестве условия, при котором тепловой режим конденсатора может считаться стационарным, можно принять соотношение $\Delta\vartheta < 0{,}05\Theta_{ср}$, где $\Delta\vartheta = \Theta_{max} - \Theta_{min}$; $\Theta_{ср}$—среднее за цикл превышение температуры конденсатора.

В случае длительного теплового режима работы имеют место интервал времени t_1, в течение которого тепловое поле нестационарное, и интервал времени t_2, в течение которого это поле стационарное (рис. 5.1.8, *а*).

Квазистационарный тепловой режим характеризуется переменой во времени мгновенной температуры, однако среднее за цикл значение температуры остается одним и тем же для разных циклов $\left(T_{ср} = \frac{1}{T_ц}\int_0^{T_ц} T(t)\,dt = \text{const}\right)$.

Квазистационарный тепловой режим может быть в случае длительного, повторно-кратковременного или кратковременного теплового режима работы конденсатора, когда мгновенная температура колеблется (пульсирует) около среднего значения. Квазистационарный тепловой режим работы конденсатора имеет место не только при простых прерывистых режимах, но также при непрерывных сложных циклических режимах теплового нагружения, когда мощность тепловыделения циклически ступенчато изменяется на двух уровнях (рис. 5.1.8, *с*; 5.1.11, *г*).

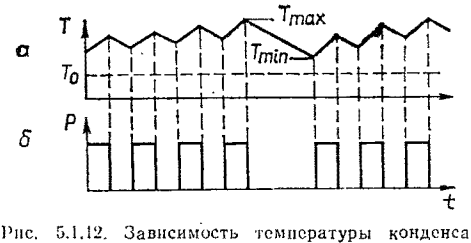


Рис. 5.1.12. Зависимость температуры конденсатора (*а*) и мощности тепловыделения (*б*) от времени в сложном циклическом режиме нагружения

Таблица 5.1.3

Тепловой режим конденсатора	Тепловой режим работы: длительный	повторно-кратковременный	кратковременный
Стационарный	+	+	—
Квазистационарный	+	+	+
Нестационарный	—	+	+

Из рис. 5.1.8, *а* следует, что в квазистационарном длительном тепловом режиме температурное поле конденсатора может быть нестационарным (участок t_1) и стационарным (участок t_2).

Нестационарный тепловой режим конденсатора имеет место в случае изменяющейся во времени мгновенной и средней за цикл температуры ($T(t)=\text{var}$, $T_{ср}=\text{var}$). Два различных стационарных и квазистационарных режима всегда разделяет нестационарный тепловой режим.

В сложных циклических режимах теплового нагружения тепловой режим конденсатора может приобретать комбинированный характер. В качестве примера на рис. 5.1.12 приведена временная зависимость температуры конденсатора в прерывистом сложном циклическом режиме теплового нагружения с двумя различными периодами, из которой видно, что на одном интервале времени тепловой режим конденсатора является нестационарным повторно-кратковременным, а в целом он может рассматриваться как квазистационарный повторно-кратковременный.

Стационарный, квазистационарный и нестационарный тепловые режимы конденсатора могут возникать не только в результате внутреннего, но и внешнего теплового воздействия.

Возможные сочетания тепловых режимов конденсаторов с учетом принятых допущений показаны в табл. 5.1.3.

Характерные соотношения между параметрами режимов теплового нагружения и тепловой постоянной времени конденсатора, при которых наблюдаются различные тепловые режимы конденсатора, приведены в табл. 5.1.4.

Принятое в табл. 5.1.4 граничное значение 0,05 соответствует полному размаху пульсации превышения температуры менее 5% от среднего за цикл значения превышения температуры ($\Theta_{ср}$).

Кроме внутренних на тепловой режим конденсатора оказывают влияние внешние тепловые воздействия.

Внешние тепловые воздействия делятся на *длительные, медленно* и *быстро изменяющиеся.*

Длительные внешние тепловые воздействия наблюдаются в устройствах, имеющих системы терморегулирования, а также установленных в помещениях, оборудованных такими системами.

Таблица 5.1.4

Тепловой режим конденсатора		Режим теплового нагружения	
		прерывистый циклический	непрерывный циклический с изменением мощности на двух уровнях
Длительный	Стационарный	$t_р/\tau_т \geqslant 3$; $t_п/\tau_т < 0{,}05$	$t_1/\tau_т \geqslant 3$; $t_2/\tau_т < 0{,}05$
	Квазистационарный	$t_р/\tau_т \geqslant 3$; $t_п/\tau_т \geqslant 0{,}05$	$t_1/\tau_т \geqslant 3$; $t_2/\tau_т \geqslant 0{,}05$
Повторно-кратковременный	Стационарный	$t_р/\tau_т < 0{,}05$; $t_п/\tau_т < 0{,}05$	$t_1/\tau_т < 0{,}05$; $t_2/\tau_т < 0{,}05$
	Квазистационарный	$t_р/\tau_т < 3$; $0{,}05 \leqslant t_п/\tau_т < 3$	$t_1/\tau_т < 3$; $0{,}05 \leqslant t_2/\tau_т < 3$
Кратковременный	»	$t_р/\tau_т < 3$; $t_п/\tau_т \geqslant 3$	$t_1/\tau_т < 3$; $t_2/\tau_т \geqslant 3$

Медленно и быстро изменяющиеся внешние тепловые воздействия обусловлены колебаниями температуры окружающей среды, причем в первом случае это обычно дневные или сезонные колебания, во втором — изменения температуры могут быть связаны, например, с быстрыми изменениями высоты полета самолета [5.1].

§ 5.2. Расчет токовых нагрузок конденсаторов

Ток является одним из факторов, влияющих на работоспособность конденсаторов, находящихся под воздействием переменного, пульсирующего и импульсного напряжения (см. § 6.1).

Расчет тока через конденсатор выполняется с целью определения допустимого уровня рабочего напряжения конденсаторов при известных характере и параметрах воздействующего напряжения, а также для выбора типономинала и схемы соединения конденсаторов в батареях, при которых обеспечивается для заданных уровня и формы воздействующего напряжения надежная работа конденсатора в течение всего срока службы.

На работоспособность конденсатора влияет как сила, так и характер тока, протекающего через конденсатор [В.11, § 6.1].

Ток конденсатора равен скорости изменения заряда на обкладках конденсатора [5.2]:

$$i = \frac{dq}{dt}; \qquad (5.2.1)$$

при $C = \text{const}$

$$i = C\frac{du}{dt}. \qquad (5.2.2)$$

Для количественной характеристики тока используются такие параметры, как амплитуда I_m и действующее значение I тока (см. § 5.1).

При синусоидальном напряжении $u = U_m \sin\omega t$ действующее значение тока конденсатора рассчитывается по формуле

$$I = \frac{U_m \omega C_{sэ}}{\sqrt{2}}, \qquad (5.2.3)$$

где U_m — амплитуда синусоидального напряжения; ω — угловая частота; $C_{sэ}$ — емкость конденсатора на частоте ω.

Амплитуда тока равна $I_m = U_m \omega C_{sэ}$.

Выражение (5.2.3) применимо в области частот, в которой $r_{sэ} \leqslant 0{,}1\,\frac{1}{\omega C_{sэ}}$, где $r_{sэ}$ — активное сопротивление конденсатора на частоте ω по последовательной схеме замещения (см. § 4.3).

При частотах, близких к частоте первого резонанса $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_э C_{sд}}}$, реактивное сопротивление конденсатора ($X_c = 1/\omega C_{sэ}$) уменьшается и становится соизмеримым с активным сопротивлением $r_{sэ}$ конденсатора. В этом случае ток конденсатора рассчитывается по формуле

$$I = \frac{U}{Z}, \qquad (5.2.4)$$

где Z — полное сопротивление конденсатора (см. § 4.1).

Более сложным и трудоемким процессом является расчет токов конденсаторов при несинусоидальном напряжении.

Из (5.2.2) следует, что мгновенное значение тока идеального конденсатора при его зарядке (разряде) через сопротивление r от источника с напряжением U_0 равно

$$i = \frac{U_0}{r} e^{-\frac{t}{rC}}, \qquad (5.2.5)$$

а амплитуда тока

$$I_m = \frac{U_0}{r}. \qquad (5.2.6)$$

При апериодическом разряде конденсатора по цепи r, L, C выражение для мгновенного значения тока имеет вид [5.2]:

$$i = -\frac{U_0}{L\sqrt{\delta_p^2 - \omega_0^2}} e^{-\delta_p t} \times$$

$$\times sh\sqrt{\delta_p^2 - \omega_0^2}\, t, \qquad (5.2.7)$$

где U_0 — напряжение на конденсаторе в момент времени $t = 0$; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ — угловая частота собственных незатухающих колебаний разрядного контура; $\delta_p = \frac{r}{2L}$ —

Таблица 5.2.1

Разряд	Длительность импульса тока $t_и$	Время нарастания тока в цепи до I_m (с момента начала разряда или зарядки)
Экспоненциальный	$t_и = 2{,}3\ rC$	$t_0 \approx 0$
Апериодический	$t_и = \dfrac{K_{0,1}}{\delta_р (1-a)} + t_1$	$t_1 = \dfrac{\ln \dfrac{1+a}{1-a}}{2\delta_р a}$
Критический колебательный	$t_и = \dfrac{4{,}9}{\delta_р} + t_1$	$t_1 = \dfrac{1}{\delta_р}$
Колебательный затухающий	$t_и = \dfrac{2{,}3}{\delta_р} + \dfrac{T_р}{4}$	$t_1 = \dfrac{T_р}{4}$

коэффициент затухания разрядного контура.

Амплитуда тока конденсатора при апериодическом разряде вычисляется по формуле

$$I_m = \frac{U_0}{L\delta_р} K\left(\frac{\omega_0}{\delta_р}\right), \qquad (5.2.8)$$

где

$$K\left(\frac{\omega_0}{\delta_р}\right) = \frac{e^{-\delta_р t_1}\, sh\delta_р \sqrt{1-(\omega_0/\delta_р)^2}\, t_1}{\sqrt{1-(\omega_0/\delta_р)^2}}$$

— коэффициент, зависящий от параметров разрядного контура.

Время t_1, по истечении которого ток в цепи принимает максимальное значение, равно

$$t_1 = \frac{\ln \dfrac{1+\sqrt{1-(\omega_0/\delta_р)^2}}{1-\sqrt{1-(\omega_0/\delta_р)^2}}}{2\delta_р \sqrt{1-(\omega_0/\delta_р)^2}}. \qquad (5.2.9)$$

Зависимость коэффициента $K\left(\frac{\omega_0}{\delta_р}\right)$ от отношения $\omega_0/\delta_р$ приведена на рис. 5.2.1.

Действующее значение тока является энергетической характеристикой протекающего через конденсатор тока и может быть найдено как среднеквадратичное значение на периоде повторения

$$I = \sqrt{\frac{1}{T_и}\int_0^{T_и} i^2 dt} \qquad (5.2.10)$$

или за время действия импульса тока

$$I_и = \sqrt{\frac{1}{t_и}\int_0^{t_и} i^2 dt}, \qquad (5.2.11)$$

где $T_и$ — период повторения; $t_и$ — длительность импульса тока. При разряде конденсатора под длительностью импульса тока понимается время, по истечении которого ток конденсатора уменьшается до 0,1 I_m (см. § 5.1).

Погрешность расчета действующего значения тока в импульсе при определении его длительности $t_и$ на уровне 0,1 I_m не превышает 1%.

В табл. 5.2.1 приведены формулы для расчета длительности импульса тока $t_и$ (на уровне 0,1) и времени t_1, по истечении которого ток в цепи достигает максимального значения при различном характере разряда.

В табл. 5.2.1 rC — постоянная времени разрядного контура; $\delta_р = \dfrac{r}{2L}$ — коэффициент затухания разрядного контура; $a = \sqrt{1-(\omega_0/\delta_р)^2}$ при $\omega_0 < \delta_р$; $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$ — период собственных незатухающих колебаний разрядного контура; $K_{0,1}$ — коэффициент согласно рис. 5.2.2.

В соответствии с выражением (5.2.11) для импульса тока экспоненциальной формы имеем

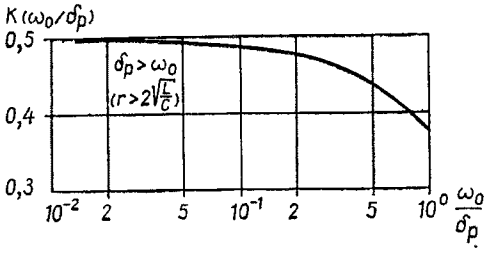


Рис. 5.2.1. Зависимость $K\left(\frac{\omega_0}{\delta_р}\right)$ от отношения $\omega_0/\delta_р$

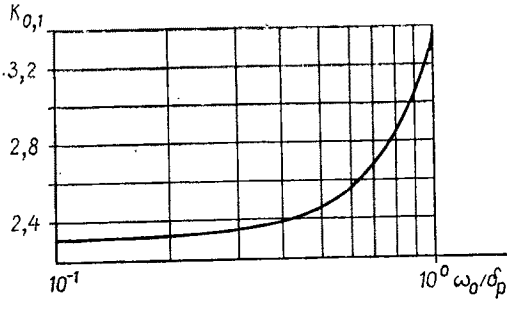


Рис. 5.2.2. Зависимость $K_{0,1}$ от отношения $\omega_0/\delta_р$, $\delta_р > \omega_0$

$$I_{\text{и}} = \frac{U_0}{r}\sqrt{\frac{rC}{2t_{\text{и}}}\left(1 - e^{\frac{2t_{\text{и}}}{rC}}\right)}. \quad (5.2.12)$$

При длительности импульса тока $t_{\text{и}} = 2{,}3\ rC$ выражение (5.2.12) упрощается и приобретает вид

$$I_{\text{и}} \simeq 0{,}47\frac{U_0}{r}.$$

Выражения для расчета действующего значения и амплитуды токов в импульсе за время $t_{\text{и}}$ при других формах воздействующего напряжения даны в табл. 5.2.2.

На рис. 5.2.3 приводится зависимость коэффициента $K\left(\frac{\delta_{\text{р}}}{\omega_0}\right)$, используемого при расчете действующего значения тока в импульсе при колебательном характере разряда.

Универсальным методом расчета действующего значения тока при несинусоидальном напряжении является метод, основанный на гармоническом анализе кривых мгновенного напряжения или тока [5.3]:

$$I = \sqrt{\sum_{k=1}^{k_{\max}} I_{\text{к}}^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^{k_{\max}} U_{\text{к}}^2/Z_{\text{к}}^2} \approx$$

$$\approx \sqrt{\sum_{k=1}^{k_{\max}} U_{\text{к}}^2\,\omega_{\text{к}}^2\,C_{\text{к}}^2}, \quad (5.2.13)$$

где $U_{\text{к}}$, $Z_{\text{к}}$, $C_{\text{к}}$ — действующее значение напряжения к-й гармоники, полное сопротивление и емкость на частоте $\omega_{\text{к}} = 2\pi f_{\text{к}}$.

Применение данного метода целесообразно при известном спектре воздействующего напряжения. Если задана форма напряжения, расчеты I по этому методу являются довольно трудоемкими, особенно при сложных формах напряжения. Приближенная оценка действующего значения тока осуществляется путем аппроксимации участков кривой воздействующего напряжения линейными или тригонометрическими функциями. При этом основными расчетными выражениями являются формулы (5.2.2) и (5.2.9), а также выражение (5.2.14):

$$I = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{п}}}\sum_{j=1}^{n} I_{\text{и}j}^2 t_{\text{ф}j}}. \quad (5.2.14)$$

На рис. 5.2.4 представлена кривая напряжения на конденсаторе, у которого перезаряд происходит по косинусоиде; $t_{\text{ф1}}$, $t_{\text{ф2}}$, $t_{\text{ф3}}$, $t_{\text{ф4}}$ — длительности фронтов, но на кривой имеются и участки, на которых напряжение не изменяется ($t_{\text{п1}}$, $t_{\text{в1}}$, $t_{\text{п2}}$, $t_{\text{в2}}$). В соответствии с (5.2.2) мгновенный ток конденсатора на участках перезаряда ($u \neq \text{const}$) изменяется по закону

$$i = -\frac{\pi C U_{\text{п.п}}}{2t_{\text{ф}}}\sin\pi\frac{t}{t_{\text{ф}}}, \text{ поскольку}$$

$$u = -\frac{U_{\text{п.п}}}{2}\cos\pi\frac{t}{t_{\text{ф}}}.$$

Амплитуда тока конденсатора при перезаряде равна

$$I_m = \frac{\pi C U_{\text{п.п}}}{2t_{\text{ф}}},$$

а действующее значение импульса тока по (5.2.11) за время $t_{\text{ф}} = t_{\text{и}}$ составит

$$I_{\text{и}} = \frac{\pi C U_{\text{п.п}}}{2\sqrt{2}\,t_{\text{ф}}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

На участках, где $u = \text{const}$, ток $i = 0$. За период $T_{\text{п}}$ через конденсатор протекает четыре импульса тока с амплитудой

$$I_{m1},\ I_{m2},\ I_{m3},\ I_{m4}.$$

Действующее значение тока на периоде повторения в соответствии с выражением (5.2.14)

$$I = \sqrt{\frac{1}{2T_{\text{п}}}\left(I_{m1}^2 t_{\text{ф1}} + I_{m2}^2 t_{\text{ф2}} + \right.}$$

$$\left. + \sqrt{I_{m3}^2 t_{\text{ф3}} + I_{m4}^2 t_{\text{ф1}}}\right);$$

при $I_{m1} = I_{m2} = I_{m3} = I_{m4} = I_m$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}\sqrt{f_{\text{п}}(t_{\text{ф1}} + t_{\text{ф2}} + t_{\text{ф3}} + t_{\text{ф4}})};$$

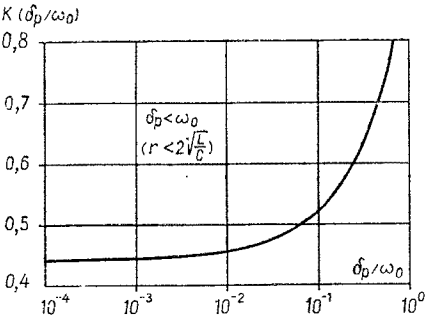


Рис. 5.2.3. Зависимость $K(\delta_{\text{р}}/\omega_0)$ от отношения $\delta_{\text{р}}/\omega_0$

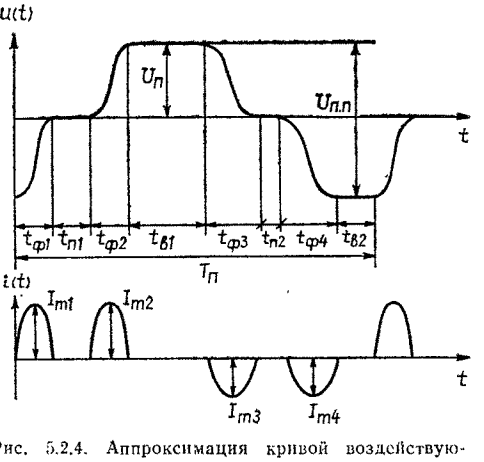
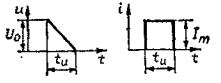
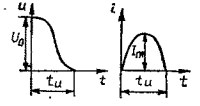
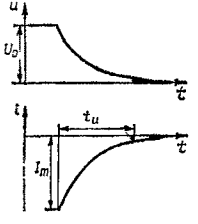
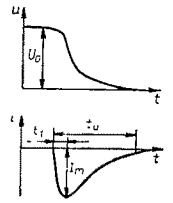
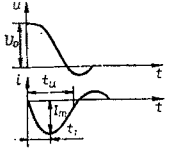


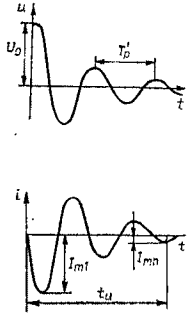
Рис. 5.2.4. Аппроксимация кривой воздействующего напряжения на конденсаторе участками тригонометрических функций

Таблица 5.2.2

Форма тока и напряжения на конденсаторе	Параметр формы	Амплитуда тока, А	Действующее значение тока за время $t_и$, А	Номер формулы
	Фронт линейный	$I_m = \frac{CU_0}{t_и}$	$I_и = I_m$	(1)
	Фронт косинусоидальный	$I_m = \frac{\pi U_0 C}{2\,t_и}$	$I_и = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$	(2)
	Фронт экспоненциальный $t_и \geqslant 2{,}3rC$	$I_m = \frac{U_0}{r}$	$I_и \cong 0{,}47\,I_m$	(3)
	$0{,}1rC \leqslant t_и < 2{,}3rC$		$I_и = I_m \sqrt{\frac{rC}{2t_и}\left(1 - e^{-\frac{2t_и}{rC}}\right)}$	(4)
	$t_и < 0{,}1rC$	$I_m \simeq \frac{CU_0}{t_и}$	$I_и \approx I_m$	(5)

Форма тока и напряжения на конденсаторе	Параметр формы	Амплитуда тока, А	Действующее значение тока за время $t_и$, А	Номер формулы
	$t_и = \frac{K_{0,1}}{\delta_р (1-a)} + t_1$ $t_1 = \frac{\ln \frac{1+a}{1-a}}{2\delta_р a}$ $a = \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_0}{\delta_р}\right)^2}$ $\delta_р = \frac{r}{2L}$ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ $\omega_0 < \delta_р$ Коэффициент $K_{0,1}$ по рис. 5.2.2	$I_m = \frac{2U_0}{r} K\left(\frac{\omega_0}{\delta_р}\right)$, где $K\left(\frac{\omega_0}{\delta_р}\right)$ по рис. 5.2.1	$I_и \cong \frac{U_0}{ra}\sqrt{\frac{1-a}{K_{0,1}}\left[\frac{1}{2(1-a)} + \frac{1}{2(1+a)} - 1\right]}$ или $I_и = \frac{U_0}{ra}\sqrt{\frac{1}{t_и \delta_р}\left[\frac{1-e^{-2\delta_р(1-a)t_и}}{2(1-a)} + \frac{1-e^{-\delta_р(1+a)t_и}}{2(1+a)} - \left(1-e^{-2\delta_р t_и}\right)\right]}$	(6)
	$t_и = \frac{4,9}{\delta_р} + t_1$ $t_1 = \frac{1}{\delta_р}$; $\omega_0 = \delta_р$	$I_m = 0,74\frac{U_0}{r}$	$I_и = 0,45\, I_m$	(7)
	$t_и < \frac{4,9}{\delta_р} + t_1$ $t_1 = \frac{1}{\delta_р}$		$I_и = 2,7\, I_m \sqrt{\frac{1}{4\delta_р t_и}\left(1-e^{-2\delta_р t_и}\right) - \left[1+\frac{\delta_р t_и}{2}\right]e^{-2\delta_р t_и}}$	(8)

Продолжение табл. 5.2.2

Форма тока и напряжения на конденсаторе	Параметр формы	Амплитуда тока, А	Действующее значение тока за время $t_и$, А	Номер формулы
	$t_и = \frac{2{,}3}{\delta_р} + \frac{T'_р}{4}$ $\omega_0 > \delta_р;\ \delta_р = \frac{r}{2L}$ $K\left(\frac{\delta_р}{\omega_0}\right)$ по рис. 5.2.3 $I_{mn} \leqslant 0{,}1\, I_{m1}$	$I_{m1} = \frac{U_0}{\omega'_р L} e^{-\frac{1{,}57\delta_р}{\omega'_р}}$ $I_{mк} = I_{m1}\, e^{-(к-1)\frac{\delta_р T'_р}{1}},$ где $K = 1,2,3,\ldots,n$ $\omega'_р = \sqrt{\omega_0^2 - \delta_р^2}$	$I_и = \frac{I_{m1}}{\sqrt{2}} \cdot K\left(\frac{\delta_р}{\omega_0}\right)$	(9)
	$t_и < \frac{2{,}3}{\delta_р} + \frac{T'_р}{4}$ $n = \frac{2t_и}{T'_р}$ — целое число полупериодов $I_{mn} > 0{,}1\, I_{m1}$		$I_и = \frac{I_{m1}}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{T'_р}{t_и} \sum_{k=1}^{n} e^{-(k-1)\delta_р T'_р}}$	(10)

а при $t_{\phi 1}=t_{\phi 2}=t_{\phi 3}=t_{\phi 4}=t_{\phi}$

$$I=\frac{2I_m}{\sqrt{2}}\sqrt{f_{\text{п}}t_{\phi}}=\frac{\pi C\,U_{\text{п.п}}}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{f_{\text{п}}}{t_{\phi}}}.$$

При сложных формах кривые напряжения целесообразно аппроксимировать линейными функциями (рис. 5.2.5). Значение тока на каждом участке будет:

$$I_{mj}=\frac{C\,(U_{j+1}-U_j)}{t_{j+1}-t_j}.$$

Импульсы тока в этом случае имеют прямоугольную форму (рис. 5.2.5) и действующее значение импульса тока равняется его амплитуде, т. е. $I_{\text{п}}=I_{\text{m}}$. Действующее значение тока на периоде повторения $T_{\text{п}}$ определяем согласно (5.2.14):

$$I=\sqrt{\frac{1}{T_{\text{п}}}\sum_{j=0}^{7}I_{mj+1}^2\,(t_{j+1}-t_j)}=$$

$$=\sqrt{\frac{1}{T_{\text{п}}}\left[I_{m1}^2\,(t_1-t_0)+I_{m2}^2\,(t_2-t_1)+\right.}$$

$$+I_{m3}^2\,(t_3-t_2)+I_{m4}^2\,(t_4-t_3)+$$

$$+I_{m5}^2\,(t_5-t_4)+I_{m6}^2\,(t_6-t_5)+$$

$$\left.+I_{m7}^2(t_7-t_6)\right].$$

Метод расчета действующего значения тока при линейно-кусочной аппроксимации является приближенным.

В табл. 5.2.2 и 5.2.3 приведены формулы для расчетов амплитуды и действующего значения тока при типовых формах воздействующего напряжения.

В связи с тем, что емкость конденсаторов некоторых видов (с оксидным диэлектриком) зависит от частоты (см. § 4.1), для повышения точности расчета необходимо подставлять в расчетные выражения значение емкости конденсатора, которое рекомендуется определять при синусоидальном напряжении на частоте $f_{\text{п}}$, а при несинусоидальном напряжении, например в случае кусочно-линейной аппроксимации, на частотах $f=\frac{1}{2(t_{j+1}-t_j)}$, а при типовых формах напряжения на частоте $f=\frac{1}{2t_{\phi}}$.

При колебательном разряде (зарядке) конденсатора емкость необходимо определять на частоте контура ω_p.

В табл. 5.2.4 приведены формулы для расчета амплитуды и действующего значения тока при протекании через конденсатор серии следующих друг за другом импульсов тока для некоторых типовых форм воздействующего напряжения.

Пример 1. Задано $U_0=120$ В, $C=3{,}3\cdot10^{-6}$ Ф, $L=5{,}32\cdot10^{-3}$ Г, $r=100$ Ом. Необходимо рассчитать амплитуду и действующее значение тока за время $t_{\text{и}}$.

Находим

$$\omega_0=\frac{1}{\sqrt{LC}}=\frac{1}{\sqrt{5{,}32\cdot10^{-3}\cdot3{,}3\cdot10^{-6}}}=7570\ \text{с}^{-1};$$

$$\delta_{\text{р}}=\frac{r}{2L}=\frac{100}{2\cdot5{,}32\cdot10^{-3}}=9400\ \text{с}^{-1}.$$

Так как $\delta_{\text{р}}>\omega_0$, то разряд апериодический; $\omega_0/\delta_{\text{р}}=7570/9400=0{,}805$. Значение коэффициента

$$a=\sqrt{1-(\omega_0/\delta_{\text{р}})^2}=\sqrt{1-(0{,}805)^2}\approx0{,}59.$$

По рис. 5.2.1 находим $K\left(\frac{\omega_0}{\delta_{\text{р}}}\right)=0{,}4$, а по рис. 5.2.2 — $K_{0,1}=2{,}86$.

По формуле (5.2.8) амплитуда тока в импульсе равна

$$I_m=\frac{U_0}{5{,}32\cdot10^{-3}\cdot9400}\cdot0{,}4=0{,}96\ \text{А}.$$

Действующее значение тока за время $t_{\text{и}}$ по формуле (6) табл. 5.2.2

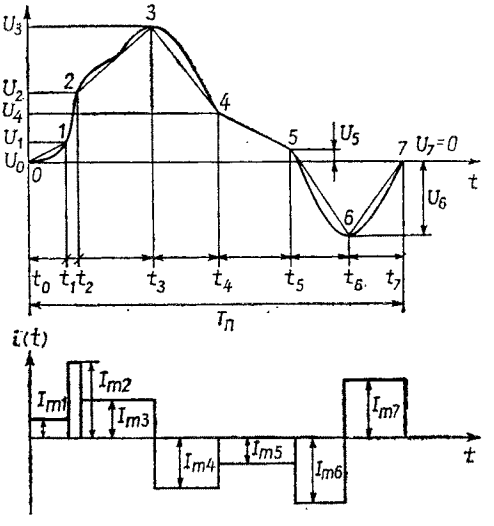


Рис. 5.2.5. К приближенному расчету действующего значения тока

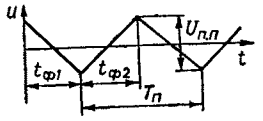
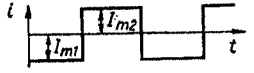
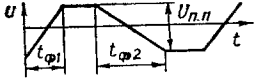
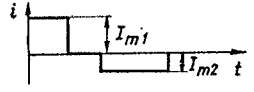
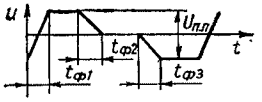
$$I=\frac{120}{100\cdot0{,}59}\sqrt{\frac{1-0{,}59}{2{,}86}\times}$$

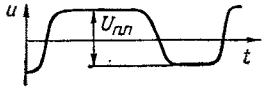
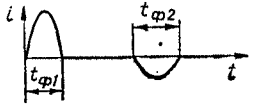
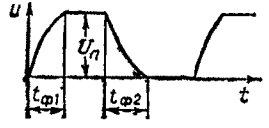
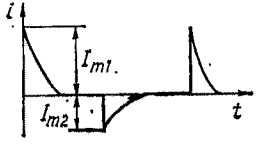
$$\times\left[\frac{1}{2\cdot(1-0{,}59)}+\frac{1}{2(1+0{,}59)}-1\right]=0{,}56\ \text{А}.$$

Время t_1, по истечении которого разрядный ток нарастает до I_m, вычисляется по формуле (5.2.9)

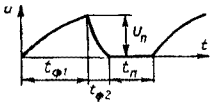
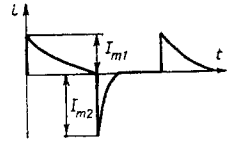
$$t_1=\frac{\ln\dfrac{1+0{,}59}{1-0{,}59}}{2\cdot9400\cdot0{,}59}=1{,}22\cdot10^{-4}\ \text{с}.$$

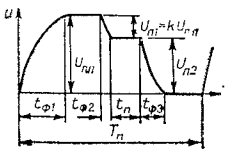
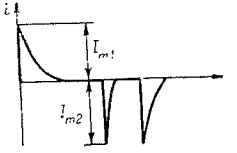
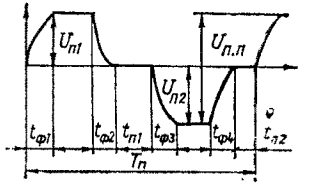
Таблица 5.2.3

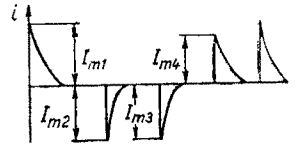
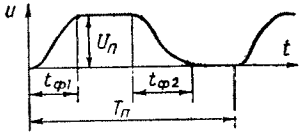
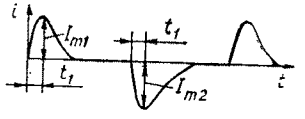
Форма тока и напряжения на конденсаторе	Параметр формы	Амплитуда тока, А	Действующее значение тока на периоде повторения, А	Номер формулы
	$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$	$I_m = 2U_{п.п} f_п C$	$I = I_m$	(1)
	$t_{ф1} = T_п - t_{ф2}$	$I_{m1} = \frac{U_{п.п} C}{t_{ф1}}$ $I_{m2} = \frac{U_{п.п} C}{T_п - t_{ф1}}$	$I = \sqrt{f_п \left(I_{m1}^2 t_{ф1} + I_{m2}^2 t_{ф2} \right)}$	(2)
	$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$	$I_{m1} = I_{m2} = \frac{U_{п.п} C}{t_ф}$	$I = I_m \sqrt{f_п 2 t_ф}$	(3)
	$t_{ф1} \neq t_{ф2}$	$I_{m1} = \frac{U_{п.п} C}{t_{ф1}}$ $I_{m2} = \frac{U_{п.п} C}{t_{ф2}}$	$I = \sqrt{f_п \left(I_{m1}^2 t_{ф1} + I_{m2}^2 t_{ф2} \right)}$	(4)
	$t_{ф1} = t_{ф2} = t_{ф3} = t_ф$	$I_{m1} = \frac{U_{п.п} C}{t_ф}$ $I_{m1} = 2I_{m2} = 2I_{m3}$	$I = I_{m1} \sqrt{\frac{3}{2} f_п t_ф}$	(5)

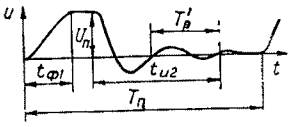
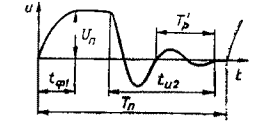
Форма тока и напряжения на конденсаторе	Параметр формы	Амплитуда тока, А	Действующее значение тока на периоде повторения, А	Номер формулы
	$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$	$I_{m1} = I_{m2} = \frac{\pi U_{п.п} C}{2t_ф}$	$I = I_m \sqrt{f_п t_ф}$	(6)
	$t_{ф1} \neq t_{ф2}$	$I_{m1} = \frac{\pi U_{п.п} C}{2t_{ф1}}$ $I_{m2} = \frac{\pi U_{п.п} C}{2t_{ф2}}$	$I = \sqrt{\frac{f_п}{2}\left(I_{m1}^2 t_{ф1} + I_{m2}^2 t_{ф2}\right)}$	(7)
	$t_{ф1} = t_{ф2} = 2{,}3rC$	$I_{m1} = I_{m2} = \frac{U_п}{r}$	$I = 0{,}66 I_m \sqrt{f_п t_ф}$	(8)
	$t_{ф1} \neq t_{ф2}$ $t_{ф1} \geqslant 2{,}3r_1C$ $t_{ф2} \geqslant 2{,}3r_2C$	$I_{m1} = \frac{U_п}{r_1}$ $I_{m2} = \frac{U_п}{r_2}$	$I = 0{,}47 \sqrt{f_п \left(I_{m1}^2 t_{ф1} + I_{m2}^2 t_{ф2}\right)}$	(9)
	$t_{ф1} = t_{ф2}$ $t_{ф1} < 2{,}3r_1C$ $t_{ф2} < 2{,}3r_2C$	$I_{m1} = \frac{U_п}{r_1}$ $I_{m2} = \frac{U_п}{r_3}$	$I = \sqrt{\frac{f_п}{2}\left[I_{m1}^2 r_1 C\left(1 - e^{-\frac{2t_{ф1}}{r_1 C}}\right) + I_{m2}^2 r_2 C\left(1 - e^{-\frac{2t_{ф2}}{r_2 C}}\right)\right]}$	(10)

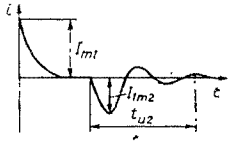
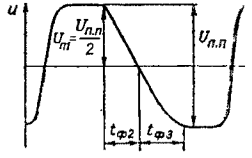
Продолжение табл. 5.2.3

Форма тока и напряжения на конденсаторе	Параметр формы	Амплитуда тока, А	Действующее значение тока на периоде повторения, А	Номер формулы
	$t_{\text{п}} = 0$ $t_{\text{ф1}} = t_{\text{ф2}} \geqslant 2{,}3rC$	$I_{m1} = I_{m2} = \dfrac{U_{\text{п}}}{r}$	$I = 0{,}66\, I_m \sqrt{f_{\text{п}} t_{\text{ф}}}$	(11)
	$t_{\text{п}} = 0$ $t_{\text{ф1}} \neq t_{\text{ф2}} \geqslant 2{,}3rC$	$I_{m1} = \dfrac{U_{\text{п}}}{r_1}$ $I_{m2} = \dfrac{U_{\text{п}}}{r_2}$	$I = 0{,}47 \sqrt{f_{\text{п}} \left(I_{m1}^2 t_{\text{ф1}} + I_{m2}^2 t_{\text{ф2}} \right)}$	(12)
	$t_{\text{п}} = 0$ $t_{\text{ф1}} \neq t_{\text{ф2}}$ $0{,}1r_1C \leqslant t_{\text{ф1}} < 2{,}3r_1C$ $0{,}1r_2C \leqslant t_{\text{ф2}} < 2{,}3r_2C$	$I_{m1} = \dfrac{U_{\text{п}}}{r_1}$ $I_{m2} = \dfrac{U_{\text{п}}}{r_2}$	$I = \sqrt{\dfrac{f_{\text{п}}}{2} \left[I_{m1}^2 r_1 C \left(1 - e^{-\frac{2t_{\text{ф1}}}{r_1 C}} \right) + I_{m2}^2 r_2 C \left(1 - e^{-\frac{2t_{\text{ф2}}}{r_2 C}} \right) \right]}$	(13)
	$t_{\text{п}} = 0$ $t_{\text{ф1}} \neq t_{\text{ф2}}$ $t_{\text{ф1}} < 0{,}1r_1C$ $t_{\text{ф2}} < 0{,}1r_2C$	$I_{m1} = \dfrac{U_{\text{п}}}{r_1} \cong \dfrac{CU_{\text{п}}}{t_{\text{ф1}}}$ $I_{m2} = \dfrac{U_{\text{п}}}{r_2} \cong \dfrac{CU_{\text{п}}}{t_{\text{ф2}}}$	$I = 0{,}47 \sqrt{f_{\text{п}} \left(I_{m1}^2 t_{\text{ф1}} + I_{m2}^2 t_{\text{ф2}} \right)}$	(14)
	$t_{\text{п}} \neq 0$ $t_{\text{ф1}} \neq t_{\text{ф2}}$ $t_{\text{ф1}} < 2{,}3r_1C$ $t_{\text{ф2}} < 2{,}3r_2C$	$I_{m1} = \dfrac{U_{\text{п}}}{r_1}$ $I_{m2} = \dfrac{U_{\text{п}}}{r_2}$	$I = \sqrt{\dfrac{f_{\text{п}}}{2} \left[r_1 C \left(1 - e^{-\frac{2t_{\text{ф1}}}{r_1 C}} \right) I_{m1}^2 + I_{m2}^2 r_2 C \left(1 - e^{-\frac{2t_{\text{ф2}}}{r_2 C}} \right) \right]}$	(15)

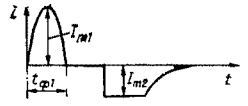
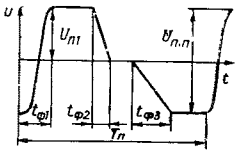
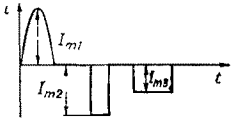
Форма тока и напряжения на конденсаторе	Параметр формы	Амплитуда тока, А	Действующее значение тока на периоде повторения, А	Номер формулы
	$0 < K = \dfrac{U_{п1}}{U_{п.п}} < 1$ $t_п \neq 0$ $t_{ф1} \neq t_{ф2} \neq t_{ф3}$ $t_{ф1} \geqslant 2{,}3 r_1 C$ $t_{ф2} \geqslant 2{,}3 r_2 C$ $t_{ф3} \geqslant 2{,}3 r_3 C$	$I_{m1} = \dfrac{U_{п.п}}{r_1}$ $I_{m2} = \dfrac{K U_{п.п}}{r_2}$ $I_{m3} = \dfrac{(1-K) U_{п.п}}{r_3}$	$I = 0{,}47 \sqrt{f_п \left(I_{m1}^2 t_{ф1} + I_{m2}^2 t_{ф2} + I_{m3}^2 t_{ф3} \right)}$	(16)
	$0 < K < 1$ $t_п \neq 0$ $t_{ф1} \neq t_{ф2} \neq t_{ф3}$ $t_{ф1} < 2{,}3 r_1 C$ $t_{ф2} < 2{,}3 r_2 C$ $t_{ф3} < 2{,}3 r_3 C$	$I_{m1} = \dfrac{U_{п.п}}{r_1}$ $I_{m2} = \dfrac{K U_{п.п}}{r_2}$ $I_{m3} = \dfrac{(1-K) U_{п.п}}{r_3}$	$I = \sqrt{\dfrac{f_п}{2} \left[I_{m1}^2 r_1 C \left(1 - e^{-\frac{2t_{ф1}}{r_1 C}} \right) + I_{m2}^2 r_2 C \left(1 - e^{-\frac{2t_{ф2}}{r_2 C}} \right) + I_{m3}^2 r_3 C \left(1 - e^{-\frac{2t_{ф3}}{r_3 C}} \right) \right]}$	(17)
	$t_{ф1} = t_{ф2} = t_{ф3} = t_{ф4} \geqslant 2{,}3 r C$ $U_{п1} = U_{п2}$	$I_{m1} = I_{m2} = I_{m3} = I_{m4} = I_m = \dfrac{U_{п1}}{r}$	$I = 0{,}94 I_m \sqrt{f_п t_ф}$	(18)
	$t_{ф1} = t_{ф3} \geqslant 2{,}3 r_1 C$ $t_{ф2} = t_{ф4} \geqslant 2{,}3 r_2 C$ $r_1 = r_3;\ r_2 = r_4$ $t_{ф1} \neq t_{ф2}$	$I_{m1} = \dfrac{U_{п1}}{r_1};\ I_{m2} = \dfrac{U_{п1}}{r_2}$ $I_{m3} = \dfrac{U_{п2}}{r_3};\ I_{m4} = \dfrac{U_{п2}}{r_4}$ $I_{m1} = I_{m3}$ $I_{m2} = I_{m4}$	$I = 0{,}47 \sqrt{f_п \left(I_{m1}^2 t_{ф1} + I_{m2}^2 t_{ф2} + I_{m3}^2 t_{ф3} + I_{m1}^2 t_{ф4} \right)}$ $I = 0{,}47 \sqrt{2 f_п \left(I_{m1}^2 t_{ф1} + I_{m2}^2 t_{ф2} \right)}$	(19) (20)

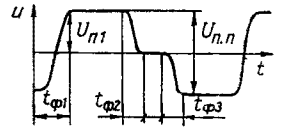
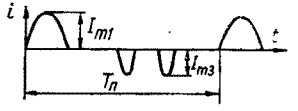
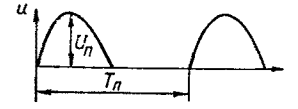
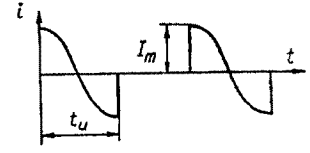
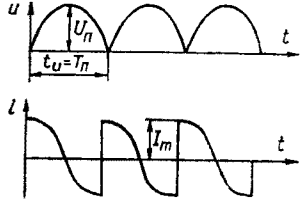
Форма тока и напряжения на конденсаторе	Параметр формы	Амплитуда тока, А	Действующее значение тока на периоде повторения, А	Номер формулы
	$t_{ф1} = t_{ф2} = t_{ф3} = t_{ф4} < 2{,}3rC$ $U_{п1} = U_{п2}$	$I_m = \frac{U_{п1}}{r}$	$I = I_m \sqrt{2f_п \left(I_m - e^{-\frac{2t_ф}{rC}}\right) rC}$	(21)
	$t_{ф1} = t_{ф3} < 2{,}3r_1C$ $t_{ф2} = t_{ф4} < 2{,}3r_2C$ $t_{ф1} \neq t_{ф2} \neq t_{ф3} \neq t_{ф4}$	$I_{m1} = \frac{U_{п1}}{r_1}$ $I_{m2} = \frac{U_{п1}}{r_2}$ $I_{m3} = \frac{U_{п2}}{r_3}$ $I_{m4} = \frac{U_{п2}}{r_4}$	$I = \sqrt{\frac{f_п}{2}\left[I_{m1}^2 r_1 C \left(1 - e^{-\frac{2t_{ф1}}{r_1C}}\right) + \right.}$ $\left. + I_{m2}^2 r_2 C \left(1 - e^{-\frac{2t_{ф2}}{r_2C}}\right) + I_{m3}^2 r_3 C \times \right.$ $\left. \times \left(1 - e^{-\frac{2t_{ф3}}{r_3C}}\right) + I_{m4}^2 r_4 C \left(1 - e^{-\frac{2t_{ф4}}{r_4C}}\right) \right]}$	(22)
	$\omega_{01} < \delta_{p1} = \frac{r_1}{2L_1}$ $\omega_{02} < \delta_{p2} = \frac{r_2}{2L_2}$ $t_{ф1} \neq t_{ф2}$ $t_ф = \frac{K_{0,1}}{\delta(1-a)} + t_1$	$I_{m1} = \frac{2U_п}{r_1} K\left(\frac{\omega_{01}}{\delta_{p1}}\right)$ $I_{m2} = \frac{2U_п}{r_2} K\left(\frac{\omega_{02}}{\delta_{p2}}\right)$, где $K\left(\frac{\omega_0}{\delta_p}\right)$ по рис. 5.2.1	$I = \sqrt{f_п \left(I_{п1}^2 t_{ф1} + I_{п2}^2 t_{ф2} \right)}$ $I_{п1}$, $I_{п2}$ рассчитываются по формулам (6) из табл. 5.2.2	(23)
	$t_{ф1} = t_{ф2}$ $\omega_{01} = \omega_{02} < \delta_{p1} = \delta_{p2}$	$I_{m1} = I_{m2} = \frac{2U_п}{r} K\left(\frac{\omega_0}{\delta_p}\right)$	$I = I_п \sqrt{2f_п t_ф}$ $I_п$ определяется по формулам (6) из табл. 5.2.2	(24)

Форма тока и напряжения на конденсаторе	Параметр формы	Амплитуда тока, А	Действующее значение тока на периоде повторения, А	Номер формулы
	$\omega_{01} < \delta_{p1} = \dfrac{r_1}{2L_1}$ $\omega_{01} = \dfrac{1}{\sqrt{L_1 C}}$ $\omega_{02} > \delta_{p2} = \dfrac{r_2}{2L_2}$ $\omega_{02} = \dfrac{1}{\sqrt{L_2 C}}$ $t_{\phi 1} = \dfrac{K_{0,1}}{\delta_p (1-a)} + t_1$ $t_{и2} = \dfrac{2,3}{\delta_{p2}} \div \dfrac{T'_p}{4}$ $\omega'_p = \sqrt{\omega_0 - \delta_{p2}^2}$	$I_{m1} = \dfrac{2U_п}{r_1} K\left(\dfrac{\omega_{01}}{\delta_{p1}}\right)$ $I_{1m2} = \dfrac{U_п}{\omega'_p L_2} e^{-\frac{1,57\delta_{p2}}{\omega'_p}}$	$I = \sqrt{f_п \left(I_{н1}^2 t_{\phi 1} \div I_{н2}^2 t_{и2} \right)}$ $I_{н1} = \dfrac{U_п}{r_1 a} \sqrt{\dfrac{1-a}{K_{0,1}} \left[\dfrac{1}{2(1-a)} + \dfrac{1}{2(1+a)} - 1 \right]}$ $I_{н2} = \dfrac{I_{1m2}}{\sqrt{2}} \cdot K\left(\dfrac{\delta_{p2}}{\omega_{02}}\right)$ $K\left(\dfrac{\delta_{p2}}{\omega_{02}}\right)$ определяется по рис. 5.2.3	(25)
	$\omega_{01} < \delta_{p1}$ $\omega_{02} = \delta_{p2}$ $t_{\phi 1} = \dfrac{K_{0,1}}{(1-a)\delta_{p1}} + t_1$ $t_{н2} = \dfrac{4,9}{\delta_{p2}} - \dfrac{1}{\delta_{p2}}$	$I_{m1} = \dfrac{2U_п}{r_1} K\left(\dfrac{\omega_{01}}{\delta_{p2}}\right)$ $I_{1m2} = 0,74 \dfrac{U_п}{r_2}$	$I = \sqrt{f_п \left[I_{н1}^2 t_{\phi 1} \div 0,2 I_{1m2}^2 t_{н2} \right]}$ $I_{н1}$ определяется по формулам (6) из табл. 5.2.2	(26)

Форма тока и напряжения на конденсаторе	Параметр формы	Амплитуда тока, А	Действующее значение тока на периоде повторения, А	Номер формулы
	$t_{\phi 1} \neq t_{u2}$ $t_{\phi 1} = 2{,}3 r_1 C$ $t_{u2} = 2{,}3 / \delta_{p2} + \frac{T'_p}{4}$ $\delta_2 = \frac{r_2}{2L_2};\ \omega_0 > \delta_{p2}$	$I_{m1} = \frac{U_п}{r_1}$ $I_{1m2} = \frac{U_п}{\omega'_p L_2} e^{-\frac{1{,}57\delta_{p2}}{\omega'_p}}$ $\omega'_p = \sqrt{\omega_0^2 - \delta_{p2}^2}$	$I = \sqrt{f_п \left[0{,}22\, I_{m1}^2\, t_{\phi 1} + \frac{I_{1m2}^2}{2} K^2 \left(\frac{\delta_{p2}}{\omega_0} \right) t_{u2} \right]}$	(27)
	$t_{\phi 1} \neq t_{u2}$ $t_{\phi 1} = 2{,}3 r C$ $t_{u2} = \frac{2{,}3}{\delta_{p2}} + \frac{T'_p}{4}$ $\omega_0 = \delta_{p2} = \frac{r_2}{2L_2}$	$I_{m1} = \frac{U_п}{r_1}$ $I_{1m2} = \frac{U_п}{\omega'_p L_2} e^{-\frac{1{,}57\delta_{p2}}{\omega'_p}}$	$I = \sqrt{f_п \left(0{,}22\, I_{m1}^2\, t_{\phi 1} + 0{,}2\, I_{1m2}^2\, t_{u2} \right)}$	(28)
	$t_{\phi 1} < 2{,}3 r_1 C$ $t_{u2} < \frac{2{,}3}{\delta_{p2}}$ $\omega_0 > \delta_{p2} = \frac{r_2}{2L_2}$ $\omega'_p = \sqrt{\omega_0^2 - \delta_{p2}}$	$I_{m1} = \frac{U_п}{r_1}$ $I_{1m2} = \frac{U_п}{\omega'_p L_2} e^{-\frac{1{,}57\delta_{p2}}{\omega'_p}}$	$I = \sqrt{\frac{f_п}{2} \left[I_{m1}^2 r_1 C \left(1 - e^{-\frac{2t_{\phi 1}}{r_1 C}} \right) + \frac{I_{1m2}^2}{2} \times \right.}$ $\left. \times T'_p \sum_{k=1}^{n} e^{-(k-1)\delta_{p2} T'_p} \right]}$, где $n = \frac{2t_{u2}}{T'_p}$, $k = 1, 2, 3, \ldots$	(29)

Продолжение табл. 5.2.3

Форма тока и напряжения на конденсаторе	Параметр формы	Амплитуда тока, А	Действующее значение тока на периоде повторения, А	Номер формулы
	$t_{ф1} \neq t_{ф2} \neq t_{ф3}$ $t_{ф3} \geqslant 2{,}3 r_3 C$ $U_{п1} = \dfrac{U_{п.п}}{2}$ $I_{m2} = I_{m3}$	$I_{m1} = \dfrac{\pi C U_{п.п}}{2t_{ф1}}$ $I_{m2} = \dfrac{C U_{п.п}}{2t_{ф2}}$ $I_{m3} = \dfrac{U_{п.п}}{2r_3}$	$I = \dfrac{U_{п.п} C}{2} \sqrt{f_п \left(\dfrac{\pi^2}{2t_{ф1}} + \dfrac{1}{t_{ф2}} + \dfrac{1{,}16}{t_{ф3}} \right)}$	(30)
	$t_{ф3} < 2{,}3 r_3 C$ $I_{m2} = I_{m3}$		$I = \dfrac{U_{п.п} C}{2} \sqrt{f_п \left(\dfrac{\pi^2}{2t_{ф1}} + \dfrac{1}{t_{ф2}} + \dfrac{1 - e^{-\frac{2t_{ф3}}{r_3 C}}}{2r_3 C} \right)}$	(31)
 	$t_{ф1} \neq t_{ф2} = t_{ф3}$ $U_{п1} = \dfrac{U_{п.п}}{2}$ $I_{m2} = I_{m3}$	$I_{m1} = \dfrac{\pi C U_{п.п}}{2t_{ф1}}$ $I_{m2} = \dfrac{C U_{п.п}}{2t_{ф2}}$	$I = \dfrac{U_{п.п} C}{2} \sqrt{f_п \left(\dfrac{\pi^2}{2t_{ф1}} + \dfrac{2}{t_{ф2}} \right)}$	(32)
	$t_{ф1} \neq t_{ф2} \neq t_{ф3}$ $U_{п1} = \dfrac{U_{п.п}}{2}$	$I_{m3} = \dfrac{C U_{п.п}}{2t_{ф3}}$	$I = \dfrac{U_{п.п} C}{2} \sqrt{f_п \left(\dfrac{\pi^2}{2t_{ф1}} + \dfrac{1}{t_{ф2}} + \dfrac{1}{t_{ф3}} \right)}$	(33)

Форма тока и напряжения на конденсаторе	Параметр формы	Амплитуда тока, А	Действующее значение тока на периоде повторения, А	Номер формулы
	$t_{ф1} \neq t_{ф2} \neq t_{ф3}$ $U_{п1} = \frac{U_{п.п}}{2}$	$I_{m1} = \frac{\pi U_{п.п} C}{2t_{ф1}}$ $I_{m2} = \frac{\pi U_{п1} C}{2t_{ф2}} = \frac{\pi U_{п.п} C}{4t_{ф2}}$ $I_{m3} = \frac{\pi U_{п2} C}{2t_{ф3}} = \frac{\pi U_{п.п} C}{4t_{ф3}}$	$I = \frac{\pi U_{п.п} C}{2\sqrt{2}} \sqrt{f_п \left(\frac{1}{t_{ф1}} + \frac{1}{4t_{ф2}} + \frac{4}{4t_{ф3}} \right)}$	(34)
	$t_{ф1} \neq t_{ф2} \neq t_{ф3}$		$I = \frac{\pi U_{п.п} C}{2\sqrt{2}} \sqrt{f_п \left(\frac{1}{t_{ф1}} + \frac{1}{2t_{ф2}} \right)}$	(35)
	—	$I_m = \frac{\pi U_п C}{t_и}$	$I = \frac{\pi U_п C}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{f_п}{t_и}}$	(36)
			$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sqrt{f_п t_и}$	(37)
	$t_и = T_п$	$I_m = \frac{\pi U_п C}{t_и}$	$I = \frac{U_п \pi C}{\sqrt{2} t_и}$	(38)

Продолжение табл. 5.2.3

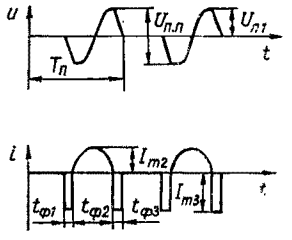
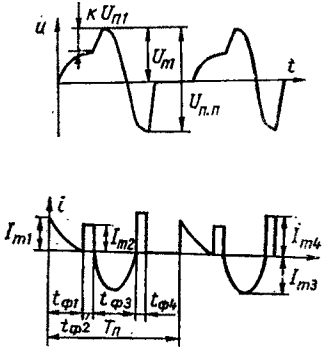
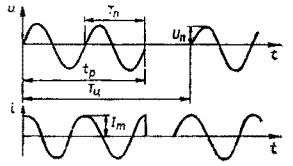
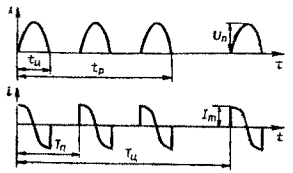
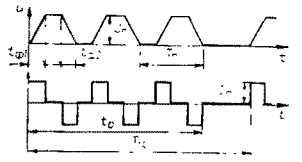
Форма тока и напряжения на конденсаторе	Параметр формы	Амплитуда тока, А	Действующее значение тока на периоде повторения, А	Номер формулы
	$t_{ф1} = t_{ф3} \neq t_{ф2}$ $I_{m1} = I_{m3}$ $U_{п1} = \frac{U_{п.п}}{2}$	$I_{m1} = \frac{U_{п1} C}{t_{ф1}}$ $I_{m2} = \frac{\pi U_{п.п} C}{2t_{ф2}}$	$I = \frac{U_{п.п} C}{2} \sqrt{f_п \left(\frac{2}{t_{ф1}} + \frac{\pi^2}{2t_{ф2}} \right)}$	(39)
	$t_{ф1} \neq t_{ф2} \neq t_{ф3} \neq t_{ф4}$ $t_{ф1} \geqslant 2{,}3 r_1 C$ $0 \leqslant k \leqslant 1$ $U_{п1} = \frac{U_{п.п}}{2}$	$I_{m1} = \frac{U_{п1}(1-k)}{r_1}$ $I_{m2} = \frac{kU_{п1} C}{t_{ф2}}$ $I_{m3} = \frac{\pi U_{п.п} C}{2t_{ф3}}$ $I_{m4} = \frac{U_{п2} C}{t_{ф4}}$	$I = \sqrt{f_п \left(0{,}22 I_{m1}^2 t_{ф1} + I_{m2}^2 t_{ф2} + \frac{t_{ф3}}{2} + I_{m3}^2 + I_{m4}^2 t_{ф4}\right)}$	(40)

Таблица 5.2.1

Форма тока и напряжения на конденсаторе	Параметр формы	Амплитуда тока, А	Действующее значение тока, А	Номер формулы
	$\omega_{\text{п}} = \dfrac{2\Pi}{T_{\text{п}}}$	$I_m = U_{\text{п}}\omega_{\text{п}}C$	$I = \dfrac{U_{\text{п}}\omega_{\text{п}}C}{\sqrt{2}}\sqrt{\dfrac{t_{\text{р}}}{T_{\text{ц}}}}$	(1)
	$t_{\text{и}} = \dfrac{T_{\text{и}}}{2}$	$I_m = \dfrac{\pi U_{\text{п}}C}{t_{\text{и}}}$	$I = \dfrac{\pi U_{\text{п}}C}{\sqrt{2}}\sqrt{\dfrac{t_{\text{р}}}{T_{\text{п}}t_{\text{и}}T_{\text{ц}}}}$	(2)
			$I = I_m\sqrt{\dfrac{t_{\text{и}}t_{\text{р}}}{2T_{\text{п}}T_{\text{ц}}}}$	(3)
	$t_{\text{ф1}} = t_{\text{ф2}} = t_{\text{ф}}$	$I_{m1} = I_{m2} = \dfrac{U_{\text{п}}C}{t_{\text{ф}}}$	$I = CU_{\text{п}}\sqrt{\dfrac{2t_{\text{р}}}{t_{\text{ф}}T_{\text{п}}T_{\text{ц}}}}$	(4)
	$t_{\text{ф1}} \neq t_{\text{ф2}}$	$I_{m1} = \dfrac{U_{\text{п}}C}{t_{\text{ф1}}}$ $I_{m2} = \dfrac{U_{\text{п}}C}{t_{\text{ф2}}}$	$I = CU_{\text{п}}\sqrt{\dfrac{t_{\text{р}}}{T_{\text{п}}T_{\text{ц}}}\left(\dfrac{1}{t_{\text{ф1}}} + \dfrac{1}{t_{\text{ф2}}}\right)}$	(5)

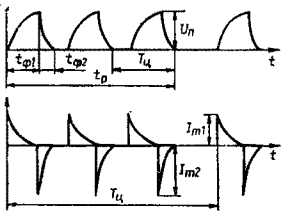
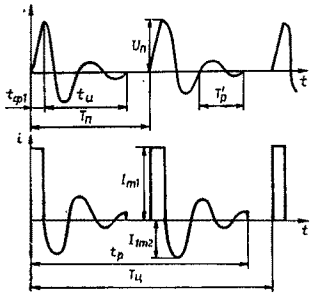
Форма тока и напряжения на конденсаторе	Параметр формы	Амплитуда тока, А	Действующее значение тока, А	Номер формулы
	$t_{ф1} \neq t_{ф2}$ $t_{ф1} \geqslant 2{,}3 r_1 C$ $t_{ф2} \geqslant 2{,}3 r_2 C$	$I_{m1} = \dfrac{U_п}{r_1}$	$I = 0{,}47 \sqrt{\dfrac{t_р}{T_п T_ц}\left(I_{m1}^2 t_{ф1} + I_{m2}^2 t_{ф2}\right)}$	(6)
	$t_{ф1} \neq t_{ф2}$ $t_{ф1} < 2{,}3 r_1 C$ $t_{ф2} < 2{,}3 r_2 C$	$I_{m2} = \dfrac{U_п}{r_2}$	$I = \sqrt{\dfrac{t_р}{2T_п T_ц}\left[I_{m1}^2 r_1 C\left(1 - e^{-\frac{2t_{ф1}}{r_1 C}}\right) + I_{m2}^2 r_2 C\left(1 - e^{-\frac{2t_{ф2}}{r_2 C}}\right)\right]}$	(7)
	$t_и = \dfrac{2{,}3}{\delta} + \dfrac{T_р'}{4}$ $\omega_0 > \delta_р = \dfrac{r}{2L}$ $K\left(\dfrac{\delta_р}{\omega_0}\right)$ по рис. 5.2.3 $\omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$ $\omega_р' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta_р^2}$	$I_{m1} = \dfrac{U_п C}{t_{ф1}}$ $I_{1m2} = \dfrac{U_п}{\omega_р' L} e^{-\frac{1{,}57\delta_р}{\omega_р'}}$	$I = \sqrt{\dfrac{t_р}{T_п T_ц}\left[I_{m1}^2 t_{ф1} + \dfrac{I_{1m2}^2}{2} K^2\left(\dfrac{\delta}{\omega_0}\right) t_ц\right]}$	(8)

Таблица 5.2.5

j	t_j, мкс	U_j, В
0	0	0
1	10	+10
2	15	+33
3	35	+70
4	52	+25
5	69	+3
6	85	—55
7	100	0

Длительность импульса тока на уровне 0,1 I_m по формуле (6) табл. 5.2.2

$$t_{\text{и}} = \frac{K_{0,1}}{\delta_{\text{р}}(1-a)} + t_1 = \frac{2{,}86}{9400(1-059)} +$$

$$+ 1{,}22\cdot 10^{-4} = 8{,}65\cdot 10^{-4}\ \text{с}.$$

Пример 2. Задано $T_{\text{и}} = 10^{-4}$ с, $C = 10$ мкФ. Форма напряжения показана на рис. 5.2.5. В табл. 5.2.5 приводятся значения дискрет напряжения.

Необходимо рассчитать действующее значение тока. По формуле $I_m = \frac{C(U_{j+1} - U_j)}{t_{j+1} - t_j}$ определяем его на участках аппроксимации (А):

$$I_{m1} = \frac{10\cdot 10^{-6}\cdot(10-0)}{(10-0)\cdot 10^{-6}} = 10;$$

$$I_{m2} = \frac{10\cdot 10^{-6}(33-10)}{(15-10)\cdot 10^{-6}} = 46;$$

$$I_{m3} = \frac{10(70-33)\cdot 10^{-6}}{(35-15)\cdot 10^{-6}} = 18{,}5;$$

$$I_{m4} = \frac{10\cdot 10^{-6}(25-70)}{(52-35)\cdot 10^{-6}} = -29{,}4;$$

$$I_{m5} = \frac{10\cdot 10^{-6}(3-25)}{(65-52)\cdot 10^{-6}} = -13;$$

$$I_{m6} = \frac{10\cdot 10^{-6}(-55-3)}{(85-69)\cdot 10^{-6}} = -36{,}2;$$

$$I_{m7} = \frac{10\cdot 10^{-6}[0-(-55)]}{(100-85)\cdot 10^{-6}} = 36{,}7.$$

Согласно формуле (5.2.14) действующее значение тока равно

$$I = \sqrt{\frac{1}{10^{-4}}[10^2\cdot 10\cdot 10^{-6} + 46^2\cdot 5\cdot 10^{-6} +}$$

$$\sqrt{+ 18{,}5^2\cdot 20\cdot 10^{-6} + 29{,}4^2\cdot 17\cdot 10^{-6} + 13^2\times}$$

$$\sqrt{\times 17\cdot 10^{-6} + 36{,}2^2\cdot 16\cdot 10^{-6} + 36{,}7\cdot 15\cdot 10^{-6}]} =$$

$$= 28{,}6\ A.$$

§ 5.3. Расчет мощности и энергии потерь в конденсаторах

Мощность потерь электрической энергии в конденсаторе (мощность тепловыделения) определяет температуру, до которой нагреваются отдельные элементы конструкции конденсатора, т. е. мощность тепловыделения является одним из факторов, от которого зависит долговечность конденсатора в условиях эксплуатации (см. § 6.1).

Мощность тепловыделения в конденсаторе, а также в отдельных элементах его конструкции необходимо знать не только для расчета его температурного поля, но и для определения допустимых параметров воздействующего напряжения, выбора конденсаторов и других целей.

При непериодических режимах нагружения возникает необходимость расчета энергии, выделяющейся в конденсаторе в виде тепла.

Расчет мощности тепловыделения в конденсаторах при синусоидальном напряжении. При синусоидальном напряжении средняя за период $T_{\text{и}}$ мощность тепловыделения в конденсаторе составляет

$$P = 2\pi U^2 f C_{\text{рэ}} \operatorname{tg}\delta. \qquad (5.3.1)$$

Здесь $C_{\text{рэ}}$ — емкость конденсатора по параллельной схеме замещения (см. § 4.3); $\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла потерь конденсатора на частоте f; U — действующее значение напряжения.

Поскольку емкость и $\operatorname{tg}\delta$ конденсаторов зависят от частоты и температуры, особенно в случае конденсаторов с оксидными и полярными диэлектриками, то в формулу (5.3.1) для получения предельно возможного значения мощности P следует подставить значение этих параметров на частоте f при среднеобъемной внутренней температуре в конденсаторе, обуславливаемой мощностью P (см. § 4.1, 5.5).

Для этого обычно используются характеристика $\operatorname{tg}\delta$ (f, T) и зависимость средней температуры от мощности.

Так как параметры конденсаторов (C, $\operatorname{tg}\delta$) имеют разброс, то в выражение (5.3.1) при определении максимально возможной мощности тепловыделения следует подставлять наибольшие значения C, $\operatorname{tg}\delta$. Температурно-частотной зависимостью $C(f, T)$ обычно пренебрегают за исключением расчетов P в конденсаторах с оксидным диэлектриком, а также в случаях, когда частота воздействующего напряжения близка к частоте первого резонанса (см. § 4.3). Мощность тепловыделения в конденсаторе может быть рассчитана также в соответствии с последовательной схемой замещения

$$P = I^2 r_{\text{эз}}, \qquad (5.3.2)$$

где I — действующее значение тока через конденсатор; $r_{\text{эз}}$ — активное сопротивление конденсатора в последовательной схеме замещения (см. § 4.3), найденное на частоте f при среднеобъемной внутренней температуре конденсатора $(r_{\text{эз}} = \operatorname{tg}\delta(f, T_{\text{с}})/2\pi f C_{\text{эз}}(f, T))$.

Чтобы более точно рассчитывать темпе-

ратурное поле конденсатора, необходимо раздельно определять мощности тепловыделения в диэлектрике и металлических частях конструкции.

Расчет мощности тепловыделения в диэлектрике производится по одной из приведенных в данном параграфе формул с подстановкой в них параметров схемы замещения диэлектрика. Мощность тепловыделения в металлических частях конструкции удобнее вычислять по выражению (5.3.2), подставляя в него значение $r_м$ (см. § 4.3).

Спектральный метод расчета мощности потерь в конденсаторах. При несинусоидальном напряжении на конденсатор воздействует спектр гармоник, иногда довольно широкий.

На основании принципа суперпозиции средняя за период мощность потерь в конденсаторе от переменной составляющей несинусоидального напряжения при параллельной схеме замещения равна

$$P = \sum_{k=1}^{\infty} 2\pi U_k^2 \, k f_1 C_к \mathrm{tg}\delta_к, \qquad (5.3.3)$$

где $f_1 = f_н$ — частота основной грамоники; U_k — действующее значение k-й гармоники напряжения; $C_к$ и $\mathrm{tg}\delta_к$ — емкость и $\mathrm{tg}\delta$ конденсатора на частоте $f_к = kf_1$, определяемые по температурно-частотным зависимостям $C(f, T)$ и $\mathrm{tg}\delta(f, T)$ при среднеобъемной температуре, обуславливаемой в конденсаторе мощностью P (см. § 4.1, 5.5). Потери от сквозного тока диэлектрика

$$P_{ут} = \frac{U^2}{R_{из}}, \qquad (5.3.4)$$

где U — действующее значение напряжения; $R_{из}$ — сопротивление изоляции конденсатора сквозному току, току утечки (см. § 4.2).

Если для конденсатора известен ток утечки, то потери энергии, вызванные им, вычисляются по формуле $P_{ут} = I_{ут}U$, где $I_{ут}$ и U — действующее значение тока утечки и напряжения на конденсаторе.

Спектр гармоник находят либо непосредственными измерениями с помощью анализаторов, либо путем разложения в ряд Фурье кривой воздействующего на конденсатор напряжения или тока.

Если известны экспериментальные значения гармоник токов, протекающих через конденсатор, или проще осуществляется разложение в ряд Фурье мгновенного тока через конденсатор, мощность потерь энергии целесообразно определять для последовательной схемы замещения

$$P = \sum_{k=1}^{\infty} I_к^2 r_{sэ}, \qquad (5.3.5)$$

где $r_{sэ}$ — активное сопротивление конденсатора по последовательной схеме замещения на частоте $f_к$; $I_к$ — действующее значение тока k-й гармоники через конденсатор. Составляющие потерь в диэлектрике и металлических частях определяются по этой же формуле с заменой в ней сопротивления $r_{sэ}$ полной схемы замещения конденсатора на сопротивления, используемые в схеме замещения металлических частей конструкции и диэлектрика в отдельности. На практике суммируют некоторое конечное число членов рядов (5.3.3) и (5.3.5), которое может быть довольно большим (до 10^3 и более), особенно при наличии скачков в кривых напряжения. Наличие множителя kf_1 в (5.3.3), а также рост $\mathrm{tg}\delta$ при увеличении частоты замедляют сходимость ряда для мощности. Так как на частотах выше первой резонансной конденсатор представляет собой активно-индуктивное сопротивление и ряд мощностей быстро затухает, то при вычислении P ограничиваются суммированием потерь только от гармоник $f_к \leqslant f_0$.

Отметим, что из-за индуктивности и активного сопротивления металлических частей конденсатора напряжение, воздействующее на диэлектрик, отличается от подведенного к выводам конденсатора. Это следует учитывать при наличии в кривой напряжения разрывов или участков с очень большой крутизной. Для определения потерь в диэлектрике в таких случаях разлагают в ряд Фурье кривую воздействующего на конденсатор напряжения, а затем находят гармоники воздействующего на диэлектрик напряжения, используя схему замещения конденсатора, приведенную на рис. 4.3.4,*а*.

Расчет мощности тепловыделения в конденсаторах при типовых формах несинусоидального напряжения. Из многообразия форм несинусоидальных напряжений, воздействующих на конденсаторы, можно выделить типовые (простые идеализированные формы), к которым сводится большое число часто встречающихся на практике напряжений.

Это прежде всего напряжения трапецеидальной формы с линейными косинусоидальными и экспоненциальными фронтами, а также гребенчатой, треугольной и пилообразной форм (рис. 5.1.2).

Такие кривые напряжения характеризуются относительно небольшим числом параметров:

— полным размахом $U_{п.п}$;

— периодом $T_п$ или частотой $f_п = \dfrac{1}{T_п}$ повторения;

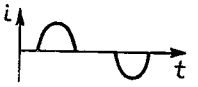
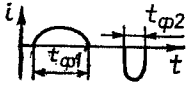
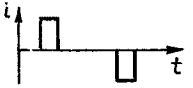
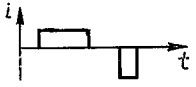
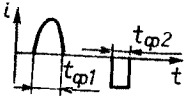
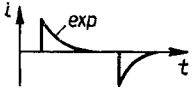
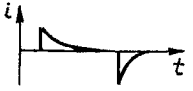
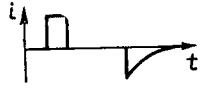
— длительностью фронтов $t_{ф1}$ и $t_{ф2}$;

— длительностью вершин $t_{в1}$ и $t_{в2}$ на верхнем и нижнем уровнях соответственно.

Для данных форм удается получить простые выражения в виде некоторых функций параметров воздействующего напряжения и конденсатора, позволяющие приближенно вычислять мощности потерь энергии в конденсаторах [В.12, 5.4].

При выводе формул использовались следующие допущения: 1) падение напряжения на $r_м$ и $L_э$ согласно схеме рис. 4.4.4, *в* от тока конденсатора существенно меньше воздействующего напряжения, т. е. последнее практически полностью приложено к диэлектрику; 2) емкость и $\mathrm{tg}\delta$ конденсатора не зависят от частоты в диапа-

Таблица 5.3.1

Форма тока	Параметр формы тока	Мощность потерь в металлических частях конструкции конденсатора $P_м$	Коэффициент увеличения потерь $\kappa_м$
	$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$	$\pi^2 U_{п.п}^2 C^2 f_п r_м / 4 t_ф$	$1{,}2 f_п t_ф$
	$t_{ф1} \neq t_{ф2}$	$\pi^2 U_{п.п}^2 C^2 f_п r_м (1/t_{ф1} + 1/t_{ф2}),8$	$(1/t_{ф1} + 1/t_{ф2})/4 f_п$
	$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$	$2 U_{п.п}^2 C^2 f_п r_м / t_ф$	$4/\pi^2 f_п t_ф$
	$t_{ф1} \neq t_{ф2}$	$U_{п.п}^2 C^2 f_п r_м (1/t_{ф1} + 1/t_{ф2})$	$2 (1/t_{ф1} + 1/t_{ф2})/\pi^2 f_п$
	$t_{ф1} \neq t_{ф2}$	$U_{п.п}^2 C^2 f_п r_м (1/8 t_{ф1} + 1/t_{ф2})$	$2 (\pi^2/8 t_{ф1} + 1 t_{ф2})/\pi^2 f_п$
	$t_{ф1} = t_{ф2} = 3\tau$	$U_{п.п}^2 C^2 f_п r_м \tau$	$2{,}\pi^2 f_п \tau$
	$t_{ф1} = 3\tau_1$ $t_{ф2} = 3\tau_2$	$U_{п.п}^2 C^2 f_п r_м (1/\tau_1 + 1/\tau_2)/2$	$(1/\tau_1 + 1/\tau_2)/\pi^2 f_п$
	$t_{ф1} \neq t_{ф2}$	$U_{п.п}^2 C^2 f_п r_м (1/2 t_{ф1} + 1/\tau)/2$	$(2 t_{ф1} + 1/\tau)/\pi^2 f_п$
	$t_{ф2} = 3\tau$	$U_{п.п}^2 C^2 f_п r_м (\pi^2/4 t_{ф1} + 1/\tau)/2$	$(2 t_{ф1} + 1/\tau)/\pi^2 f_п$

зоне, где сосредоточена основная доля мощности потерь в конденсаторе.

Мощность тепловыделения в металлических частях конденсатора при $r_м = \text{const}$

$$P_м = I^2 r_м, \qquad (5.3.6)$$

где $r_м$ — эквивалентное сопротивление металлических частей конденсатора в последовательной схеме замещения (рис. 4.4.4, *а*); I — действующее значение тока через конденсатор, расчитываемое по формулам § 5.2.

В табл. 5.3.1 приведены формулы для расчета $P_м$ некоторых типовых форм тока. При сильной зависимости $r_м$ от частоты мощность потерь $P_м$ при трапецеидальной форме напряжения приближенно равна

$$P_м = I_1^2 r_м' \frac{t_{ф1}}{T_п} + I_2^2 r_м'' \frac{t_{ф2}}{T_п},$$

где I_1 и I_2 — действующие значения импульсов тока, рассчитываемые по формулам § 5.2; $r_м'$ и $r_м''$ — эквивалентные активные сопротивления металлических частей конденсатора в последовательной схеме замещения на частотах $f' = \dfrac{1}{2t_{ф1}}$ и $f'' = \dfrac{1}{2t_{ф2}}$. В табл. 5.3.1 приведены также значения коэффициента $k_м$, равного отношению $P_м$ при несинусоидальном токе к $P_м$ при синусоидальном токе в случае равных значений величин C, $U_{п.п}$ и $f_п$.

В табл. 5.3.2 приведены формулы для расчета мощности тепловыделения в диэлектрике конденсаторов для некоторых типовых форм напряжения [В.12, 5.4].

При выводе формул, приведенных в табл. 5.3.2, использовались соотношения (5.3.3) и (5.3.5). Ряды суммировались до бесконечности, т. е. здесь получены верхние оценки мощности потерь энергии в диэлектрике.

При этом во внимание принималась только переменная составляющая напряжения. Потери от постоянной составляющей напряжения в сопротивлении утечки рассчитываются по формуле (5.3.4). Изменение тангенса угла потерь диэлектрика с частотой и температурой в этих формулах учитывается так: его значение находится по зависимости $\operatorname{tg}\delta(f, T)$ диэлектрика для среднеобъемной температуры $T_с$ (см. § 5.5) на средней частоте $f_с$, зависящей от формы кривой напряжения и ее параметров (табл. 5.3.2). Средняя частота определена из условия деления спектра мощности на две равные по суммарным значениям части [5.5].

По формулам табл. 5.3.2 можно рассчитать полную мощность потерь энергии в конденсаторе без разделения ее на потери в диэлектрике и металлических частях. В данном случае необходимо на средней частоте $f_с$ знать $\operatorname{tg}\delta(f_с, T_с)$ для всего конденсатора.

Увеличение потерь в конденсаторе при типовых формах напряжения по сравнению с синусоидальной можно оценить по коэффициенту $k_п$, приведенному в табл. 5.3.2 и равному отношению потерь при типовых формах несинусоидального напряжения к потерям при синусоидальном напряжении, имеющего $f = f_п$ и такой же полный размах, т. е. при условии, что действующее значение синусоидального напряжения $U = \dfrac{U_{п.п}}{2\sqrt{2}}$.

Расчеты потерь по формулам табл. 5.3.2 с учетом частотной зависимости $\operatorname{tg}\delta$ дают результаты, несколько отличающиеся от точных значений, полученных, например, по формуле (5.3.3). Погрешность расчетов зависит от характера частотной зависимости $\operatorname{tg}\delta$, частоты основной гармоники и значения $f_с$. В табл. 5.3.3 приведены характерные ситуации и максимальные значения погрешностей расчета, охватывающие случаи, встречающиеся на практике.

Более точные результаты получаются при раздельном расчете мощностей потерь в диэлектрике и металлических частях конструкции конденсатора. В работе [5.6] приводится методика расчета мощности, учитывающая более широкий класс зависимостей $\operatorname{tg}\delta(f)$.

Для трапецеидальных напряжений с экспоненциальными фронтами можно использовать формулы, полученные для линейных фронтов, положив в них $t_ф = 1{,}5\,\tau$ $\left(\text{при } \tau \leqslant \dfrac{T_п}{6}\right)$, где τ — постоянная времени экспоненты. Погрешность определения P при этом не превышает 10%.

Пример. Необходимо рассчитать мощность потерь энергии в конденсаторе емкостью $C = 10^{-6}$ Ф при следующих условиях: напряжение симметричной ($t_{ф1} = t_{ф2}$, $t_{в1} = t_{в2}$) трапецеидальной формы с экспоненциальными фронтами $\tau_1 = \tau_2 = 10^{-5}$ с; частота повторения $f_п = 10^3$ Гц; $U_{п.п} = 10^2$ В; $r_м = 10^{-2}$ Ом; $\operatorname{tg}\delta_д = 2 \cdot 10^{-4} = \text{const}$. Определяем $t_{ф1} = t_{ф2} = 1{,}5 \cdot 10^{-5}$ с и по формуле табл. 5.3.2 для симметричного трапецеидального напряжения находим

$$P_д = 1{,}5 \cdot 10^4 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \times$$

$$\times\ 10^{-4} \lg \frac{1{,}4}{10^3 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-5}} = 5{,}9 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}.$$

Потери в металлических частях определяем по формуле табл. 5.3.1

$$P_м = \frac{10^4 \cdot 10^3 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-2}}{10^{-5}} = 10^{-2} \text{ Вт}.$$

Полная мощность потерь составит

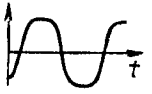
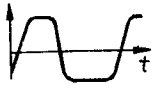
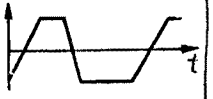
$$P = P_д + P_м = 1{,}59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}.$$

Непосредственный расчет полной мощности при

$$f_с = \sqrt{\frac{f_п}{2t_ф}} = \sqrt{\frac{10^3}{2 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-5}}} =$$

$$= 5{,}8 \cdot 10^3 \text{ Гц};$$

Таблица 5.3.2

Номер рисунка	Форма напряжения	Параметр формы напряжения	Мощность потерь в диэлектрике, Вт	Средняя частота, Гц	Коэффициент увеличения потерь $K_п$
5.1.2,*а*		$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$ $t_{в1} = t_{в2}$	$1{,}5U^2_{п.п}\, f_п C \operatorname{tg}\delta_c \lg \dfrac{1{,}8}{f_п\, t_ф}$	$\sqrt{\dfrac{f_п}{2t_ф}}$	$1{,}9 \dfrac{\operatorname{tg}\delta_c}{\operatorname{tg}\delta_1} \lg \dfrac{1{,}8}{f_п\, t_ф}$
		$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$ $t_{в1} = t_{в2}$	$1{,}4U^2_{п.п}\, f_п C \operatorname{tg}\delta_c \lg \dfrac{t_{в1} + t_ф}{0{,}17\, t_ф}$	$\sqrt{\dfrac{f_п}{2t_ф} \cdot \dfrac{0{,}3}{t_ф}}$	$1{,}8 \dfrac{\operatorname{tg}\delta_c}{\operatorname{tg}\delta_1} \lg \dfrac{t_{в1} + t_ф}{0{,}17 t_ф}$
		$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$ $t_{в1} = 0$	$1{,}1U^2_{п.п}\, f_п C \operatorname{tg}\delta_c$	$\dfrac{0{,}3}{t_ф}$	$1{,}4 \dfrac{\operatorname{tg}\delta_c}{\operatorname{tg}\delta_1}$
		$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$ $t_{в1} = t_{в2}$	$1{,}5U^2_{п.п}\, f_п C \operatorname{tg}\delta_c \lg \dfrac{1{,}4}{f_п\, t_ф}$	$\sqrt{\dfrac{f_п}{2t_ф}}$	$1{,}9 \dfrac{\operatorname{tg}\delta_c}{\operatorname{tg}\delta_1} \lg \dfrac{1{,}4}{f_п\, t_ф}$

Продолжение табл. 5.3.2

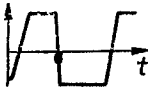
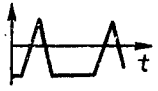
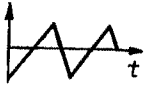
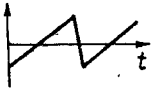
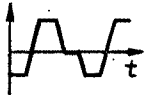
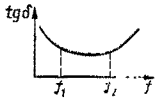
Номер рисунка	Форма напряжения	Параметр формы напряжения	Мощность потерь в диэлектрике, Вт	Средняя частота, Гц	Коэффициент увеличения потерь $K_п$
5.1.2,*б*		$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$ $t_{в1} \neq t_{в2}$	$1{,}4U^2_{п.п} f_п C \operatorname{tg}\delta_c \lg \dfrac{t_{в1} + t_ф}{0{,}22 t_ф}$	$\sqrt{\dfrac{f_п}{2t_ф}} \div \dfrac{0{,}3}{t_ф}$	$1{,}8 \dfrac{\operatorname{tg}\delta_c}{\operatorname{tg}\delta_1} \lg \dfrac{t_{в1} + t_ф}{0{,}22 t_ф}$
		$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$ $t_{в1} = 0$	$0{,}9U^2_{п.п} f_п C \operatorname{tg}\delta_c$	$\dfrac{0{,}3}{t_ф}$	$1{,}1 \dfrac{\operatorname{tg}\delta_c}{\operatorname{tg}\delta_1}$
		$t_{ф1} = t_{ф2} = \dfrac{1}{2f_п}$ $t_{в1} = t_{в2} = 0$	$0{,}54U^2_{п.п} f_п C \operatorname{tg}\delta_c$	$f_п$	$0{,}7 \dfrac{\operatorname{tg}\delta_c}{\operatorname{tg}\delta_1}$
		$t_{ф1} > t_{ф2} = t_ф$ $t_{в1} = t_{в2} = 0$	$073U^2_{п.п} f_п C \operatorname{tg}\delta_c \left(\dfrac{1/f_п}{1/f_п - t_ф}\right)^2 \lg \dfrac{0{,}7}{f_п t_ф}$	$f_п \div \dfrac{0{,}11}{t_ф}$	$0{,}93 \left(\dfrac{1/f_п}{1/f_п - t_ф}\right)^2 \dfrac{\operatorname{tg}\delta_c}{\operatorname{tg}\delta_1} \lg \dfrac{0{,}7}{f_п t_ф}$
5.1.2,*в*		$t_{ф1} = t_{ф2} = t_{ф3} = t_ф$	$1{,}1U^2_{п.п} f_п C \operatorname{tg}\delta_c \lg \dfrac{1{,}2}{f_п t_ф}$	$\sqrt{\dfrac{f_п}{2t_ф}}$	$1{,}4 \dfrac{\operatorname{tg}\delta_c}{\operatorname{tg}\delta_1} \lg \dfrac{1{,}2}{f_п t_ф}$

Таблица 5.3.3

Частотная зависимость $\mathrm{tg}\delta$	Соотношение между f_c, $f_п$, f_1 и f_2		Знак и значение (%) максимальных погрешностей расчета P по формулам табл. 5.3.2
	$f_п < f_1$	$f_c < f_1$	$-(5-10)$
		$f_1 < f_c < f_2$	$-(10-20)$
		$f_c > f_2$	$\pm(3-5)$
		$f_c < f_2$	$\pm(2-3)$
	$f_п < f_2$	$f_c > f_1$	$+(5-10)$
	$f_п > f_2$	$f_c \gg f_1$	$+(10-20)$

$$\mathrm{tg}\delta_c = \mathrm{tg}\delta_д + 2\pi f_c r_м C = 2\cdot 10^{-4} + 2\pi\cdot 5{,}8\cdot 10^{3}\cdot 10^{4-6}\cdot 10^{-2} = 5{,}64\cdot 10^{-4}$$

дает

$$P = 1{,}5\cdot 10^{4}\cdot 10^{3}\cdot 10^{-6}\cdot 5{,}64\cdot 10^{-4}\times \lg\frac{1{,}4}{10^{3}\cdot 1{,}5\cdot 10^{-5}} = 1{,}66\cdot 10^{-2}\ \text{Вт}.$$

При различных длительностях фронтов следует брать

$$t_ф = \frac{t_{ф1} + t_{ф2}}{2} \text{ при } \frac{t_{ф\ max}}{t_{фmin}} \leqslant 5;$$

$$t_ф = \frac{t_{ф1} + t_{ф2}}{3} \text{ при } \frac{t_{ф\ max}}{t_{фmin}} > 5.$$

Погрешность расчета мощности в этом случае не превышает 10—15%. Однако при экстремально малых и экстремально больших соотношениях $t_ф/T_п$ погрешность расчета P возрастает, что является следствием нарушения принятых допущений и особенностей метода. Анализ погрешностей расчета мощности потерь в зависимости от параметров напряжения для данных случаев дан в [В.12]. Область, в которой погрешность расчета P по формулам табл. 5.3.2. не превышает 10—20%, ограничена значениями

$$10^{6} > \frac{1}{f_п t_ф} > 3;\quad \frac{1}{t_{ф\ min}} < 1{,}9 f_0,$$

что в большинстве практических случаев удовлетворяется.

Для практики представляет интерес характер зависимостей мощностей тепловыделения в конденсаторе в целом и двух ее основных составляющих (потерь в диэлектрике и металлических частях) от таких параметров, как частота повторения, длительность фронтов, скважность.

Формулы, приведенные в табл. 5.3.1 и 5.3.2, позволяют выполнить такой анализ. Если, например, частота повторения изменяется во времени по линейному закону от f_{min} до f_{max} за некоторое время t, то средняя за это время мощность тепловыделения приближенно может быть рассчитана по формулам табл. 5.3.2, полагая $f_п = \frac{f_{min} + f_{max}}{2}$. Такой подход обуславливает завышение потерь (положительная погрешность расчета, составляющая около 10%, несколько увеличивается (до 15—20%) при больших скоростях изменения частоты и большом отношении f_{max}/f_{min}).

Используя данные табл. 5.3.1 и 5.3.2, можно получить зависимости отношения потерь в металлических частях конструкции к потерям в диэлектрике от частоты повторения, длительностей фронта и т. п. Так, с ростом частоты при $\mathrm{tg}\delta = \text{const}$ потери растут медленнее, чем пропорциональная зависимость от частоты. Однако в области частот, где преобладают потери в $r_м$, полные потери в конденсаторе почти пропорциональны частоте.

Определенный интерес для практики представляет анализ зависимости потерь от отношения $\frac{T_п}{T_п - t_в}$ для трапецеидальных импульсов (рис. 5.3.1.). Максимальная мощность тепловыделения при $\mathrm{tg}\delta = \text{const}$ имеет место для симметричной формы U, т. е. при скважности $q = 2$.

Расчет мощности и энергии тепловыделения в конденсаторе при сложных формах напряжения. Наличие схем замещения диэлектрика и конденсатора с частотно-независимыми элементами (см. § 4.3) дает возможность рассчитывать потери энергии без использования гармонического анализа кривой воздействующего напряжения.

Для определения потерь энергии в диэлектрике достаточно найти потери в сопротивлении изоляции конденсатора сквозному току:

$$W_{\text{и}} = \frac{1}{R_{\text{из}}} \int_0^t u^2\, dt,$$

а также потери в каждом из релаксаторов W_i, т. е. в сопротивлениях R_i каждой из R_iC_i-цепочек схемы замещения (рис. 4.3.2), находящихся под тем же напряжением u:

$$W_i = R_i \int_0^t i^2\, dt;$$

i — мгновенное значение тока релаксатора. Тогда энергия потерь составит

$$W_{\text{д}} = W_{\text{и}} + \sum_{i=1}^{n} W_i,$$

а средняя за время $T_{\text{и}}$ мощность потерь в диэлектрике равна

$$P_{\text{д}} = W_{\text{д}}/T_{\text{и}}.$$

Методики вычисления энергии потерь при различных формах напряжения приведены в работах [В.11, В.12, 4.9, 5.7, 5.8].

Так, в [4.9] предлагается использовать кусочно-линейную аппроксимацию воздействующего на диэлектрик напряжения (рис. 5.3.2):

$$u_j = a_j + b_j(t - t_{j-1});\ t_{j-1} \leqslant t \leqslant t_j;$$

$$j = 1,\ 2,\ \ldots,\ M;\ \Delta t_j = t_{j-1};\ a_j = u(t_{j-1});$$

$$b_j = \frac{u(t_j) - u(t_{j-1})}{\Delta t_j} \text{ при } \Delta t_j \neq 0,$$

$$a_j \text{ и } b_j = 0 \text{ при } \Delta t_j = 0.$$

Тогда энергия потерь в i-м релаксаторе за j-й интервал времени

$$W_{ij} = \frac{1}{R_i}\left[(b_j\tau_i)^2\,\Delta t_j + (U_{ij} + b_j\tau_i - a_j) \times \right.$$

$$\times \tau_i\left(1 - e^{-\Delta t_j/\tau_i}\right)\left\{\left(1 + e^{-\Delta t_j/\tau_i}\right) \times \right.$$

$$\left.\left. \times \frac{U_{ij} + b_j - a_j}{2} - 2b_j\tau_i \right\}\right],$$

где U_{ij} — напряжение на емкости i-го релаксатора в начале j-го интервала, определяемое рекуррентным соотношением

$$U_{ij} = a_{j-1} + b_{j-1}(\Delta t_{j-1} - \tau_i) +$$

$$+ (U_{ij-1} + b_{j-1} - a_{j-1})\, e^{-\Delta t_{j-1}/\tau_i}.$$

Полная энергия потерь получается суммированием W_{ij} по интервалам времени и релаксатором R_iC_i:

$$W = \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=1}^{n} W_{ij}.$$

Более простой, но менее точный метод расчета W_{ij} построен на кусочно-постоянной аппроксимации кривой u. Расчетные формулы в этом случае получаются из приведенных выше уравнений заменой нулем величин b_j.

В приложении 2 приведена программа, реализующая метод расчета энергии и средней мощности потерь при кусочно-линейной аппроксимации воздействующего напряжения произвольной формы. Для выполнения расчетов по этой программе необходимо знать: 1) параметры схемы замещения конденсаторного диэлектрика R_i, C_i $i=1,\ 2,\ \ldots,\ n$; 2) дискреты U_j, задающие форму напряжения, воздействующего на диэлектрик; u в узлах t_j, используемые при кусочно-линейной аппроксимации (рис. 5.3.2); 3) значения t_j — моментов времени, соответствующих узлам аппроксимации u на заданном временном интервале; 4) точность установления квазистационарного режима в релаксаторах Δ.

Изложенным выше способом можно рассчитывать не только потери в диэлектрике, но и полные потери в конденсаторе. Для этого надо использовать параметры схемы замещения R_iC_i всего конденсатора (см. § 4.3 и приложение 1).

При необходимости могут быть найдены также потери в металлических частях конденсаторов, полагая, что ток на интервалах линейной аппроксимации $i_j = C_0\left(\frac{du}{dt}\right)_j = C_0 b_j$, а $r_{\text{м}}$ не зависит от частоты:

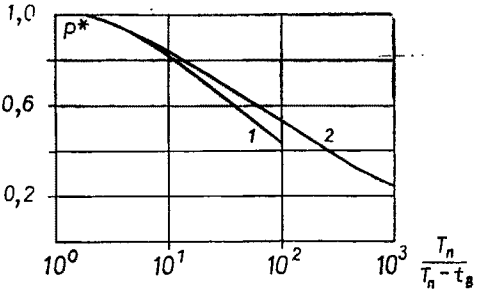


Рис. 5.3.1. Зависимость относительной мощности тепловыделения в диэлектрике, имеющем $\operatorname{tg}\delta = \text{const}$, от $T_{\text{п}}/(T_{\text{п}} - t_{\text{в}})$ для импульсов трапецеидальной формы с фронтами одинаковой длительности косинусоидальной формы: кривая 1 — для $t^*_{\text{ф}} = t_{\text{ф}}/T_{\text{п}} = 0{,}1$; 2 — для $t^*_{\text{ф}} = 0{,}001$

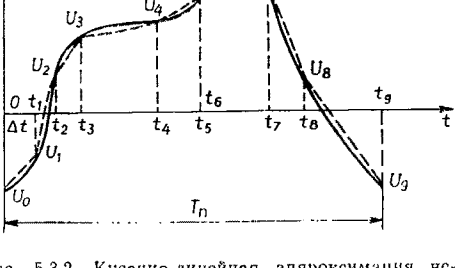


Рис. 5.3.2. Кусочно-линейная аппроксимация несинусоидального напряжения сложной формы

$$W_{\text{м}} = \sum_{j=1}^{M} (C_0 b_j)^2 r_{\text{м}} \Delta t_j;\ P_{\text{м}} = \frac{W_{\text{м}}}{T_{\text{п}}};$$

$$T_{\text{п}} = \sum_{j=1}^{M} \Delta t_j.$$

Полная мощность потерь энергии в конденсаторе находится как сумма мощностей тепловыделения в диэлектрике и металлических частях (2.2.5):

$$P = P_{\text{д}} + P_{\text{м}}. \qquad (5.3.7)$$

При этом мощность потерь в диэлектрике равна сумме потерь от сквозного тока [см. формулу (5.3.4)] и поляризационных потерь, определяемых методами, изложенными в данном параграфе.

Погрешность расчетов энергии и мощности потерь по этому методу зависят от числа релаксаторов (R_iC_i-цепочек), погрешности определения параметров схемы замещения R_iC_i, а также от погрешности аппроксимации кривой u, т. е. от числа и расположения узлов аппроксимации.

Погрешность расчета потерь, не превосходящая $\pm 10\%$, достигается обычно при числе релаксаторов $n = E\{1 + \lg f_0/f_{\text{п}}\}$, где f_0 — частота первого резонанса конденсатора, $E\{x\}$ — целая часть $\{x\}$, причем $\tau_{i\,\max} = (R_iC_i)_{\max} \approx \dfrac{10}{f_{\text{п}}}$ C: $f_{\text{п}}$ — частота повторения.

Для большинства практических случаев расчета потерь достаточно иметь в схеме замещения 3—6 релаксаторов. Указанная погрешность расчета потерь не превышается, если среднеквадратичная ошибка аппроксимации и не превосходит 3—5%.

Рассмотренный выше метод дает возможность рассчитывать потери энергии на отдельных участках кривой u, а также в каждом релаксаторе R_iC_i.

Основная область применения этого метода — расчет потерь при сложных (негиповых) формах периодического и непериодического напряжения.

Метод расчета мощности потерь энергии в конденсаторах, основанный на применении переходной функции конденсаторов. При использовании модели конденсатора, показанной на рис. 4.3.7, переходная функция представляет собой сумму

$$h(t) = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i} \exp(-t/\tau_i) + \delta(t),$$

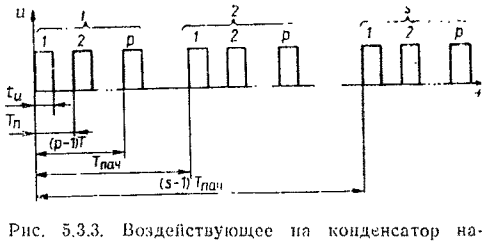


Рис. 5.3.3. Воздействующее на конденсатор напряжение в прерывистом сложном циклическом режиме электрического нагружения

где $\tau_i = R_iC_i$; $\delta(t)$ — дельта-функция Дирака.

Средняя мощность потерь энергии в i-м релаксаторе за период повторения $T_{\text{п}}$ импульсного напряжения определяется по формуле

$$P_i = \frac{1}{T_{\text{п}}} \int_0^{T_{\text{п}}} u i dt,$$

где u и i — мгновенные значения напряжения и тока.

При заданном законе изменения напряжения и известной переходной функции i-го релаксатора ток i находится методом наложения с использованием интеграла Дюамеля. Полные потери в конденсаторе равны

$$P = \sum_{i=1}^{n} P_i.$$

Расчет потерь энергии в конденсаторах, работающих в прерывистых импульсных режимах. Если на единичный релаксатор воздействует серия из s пачек прямоугольных импульсов, в каждой из которых по p импульсов (рис. 5.3.3), то выражение для средней на интервале воздействия мощности потерь в релаксаторе приобретает вид

$$P = \frac{U_{\text{п.п}}^2 C_i}{T_{\text{п}}} \left\langle \left(1 - \exp\frac{t_{\text{и}}}{\tau_i}\right) \times \right.$$

$$\times \left\{ \frac{\exp T_{\text{п}}/\tau_i - \exp\left[-(p-1)\,T_{\text{и}}/\tau_i\right]}{\exp T_{\text{п}}/\tau_i - 1} \times \right.$$

$$\times \frac{1 - \exp\left[-(s-1)\,T_{\text{пач}}/\tau_i\right]}{\exp T_{\text{пач}}/\tau_i - 1} +$$

$$\left. + \frac{1 - \exp\left[-(p-1)\,T_{\text{п}}/\tau_i\right]}{\exp T_{\text{п}}/\tau_i - 1} \right\} +$$

$$\left. + 1 \right\rangle \left[1 - \exp\left(-t_{\text{и}}/\tau_i\right)\right]. \qquad (5.3.8)$$

Частные случаи

1) При $s = 1$ на релаксатор действует серия из конечного числа импульсов. При этом условии $\exp[-(s-1)T_{\text{пач}}/\tau_i] = 1$, а формула (5.3.8) принимает вид

$$P = \frac{U_{\text{п.п}}^2 C_i}{T_{\text{п}}} \left\{ \left(1 - \exp t_{\text{и}}/\tau_i\right) \times \right.$$

$$\times \frac{1 - \exp\left[-(p-1)\,T_{\text{п}}/\tau_i\right]}{\exp T_{\text{п}}/\tau_i - 1} +$$

$$\left. + 1 \right\} \left[- \exp\left(-t_{\text{и}}/\tau_i\right)\right]. \qquad (5.3.9)$$

Выражение (5.3.9) можно представить в виде

$$P = \frac{U_{\text{п.п}}^2 C_i}{T_{\text{п}}} N_{ip},$$

где

$$N_{ip} = N_{i1} + N_{i2} N_{i3}; \qquad (5.3.10)$$

$$N_{i1} = \frac{[\exp(T_{\text{п}} - t_{\text{и}})/\tau_i - 1](\exp t_{\text{и}}/\tau_i - 1)}{\exp T_{\text{п}}/\tau_i - 1}$$

— коэффициент, характеризующий потери энергии в i-м релаксаторе при данной форме импульсного напряжения в установившемся режиме [при $p \to \infty$ (рис. 5.3.4–5.3.6.)]; $N_{i3} = \exp[-(p-1)T_{\text{п}}/\tau_i]$ — коэффициент, учитывающий только параметры кратковременного режима для i-го релаксатора и не зависящий от формы импульсного напряжения;

$$N_{i2} = \frac{\left(\exp \frac{t_{\text{и}}}{\tau_i} - 1\right)^2}{\exp \frac{t_{\text{и}}}{\tau_i}\left(\exp \frac{T_{\text{п}}}{\tau_i} - 1\right)}$$

— коэффициент, характеризующий потери энергии в i-м релаксаторе при данной форме импульсного напряжения в переходном процессе.

2) При $p = 1$ вместо s пачек получаем серию из s импульсов, следующих с периодом повторения $T_{\text{пач}}$. При таком условии $\exp[-(p-1)T_{\text{п}}/\tau_i] = 1$, а выражение (5.3.8) преобразуется к виду

$$P = \frac{U_{\text{п.п}}^2 C}{T_{\text{пач}}} \left\{ (1 - \exp t_{\text{и}}/\tau_i) \times \right.$$

$$\times \frac{1 - \exp[-(s-1)T_{\text{пач}}/\tau_i]}{\exp T_{\text{пач}}/\tau_i - 1} +$$

$$\left. + 1 \right\} [1 - \exp(-t_{\text{и}}/\tau_i)]. \qquad (5.3.11)$$

3) При $p \to \infty$ (см. п. 1) или при $s \to \infty$ (см. п. 2) формулы (5.3.9) или (5.3.11) преобразуются в формулу Гросса [В.11]:

$$P = \frac{U_{\text{п.п}}^2 C_i}{T_{\text{и}}(\exp T_{\text{и}}/\tau_i - 1)} \left[\exp(T_{\text{п}} - t_{\text{и}})/\tau_i - 1 \right] \times$$

$$\times (\exp t_{\text{и}}/\tau_i - 1).$$

Если в уравнении (5.3.8) количество пачек $s \to \infty$, то получим формулу для расчета стационарного значения мощности потерь в прерывистом сложном циклическом режиме электрического нагружения (см. § 5.1):

$$P = \frac{U_{\text{п.п}}^2 C_i}{T_{\text{и}}} \left\{ (1 - \exp t_{\text{и}}/\tau_i) \times \right.$$

$$\times \left[\frac{\exp T_{\text{и}}/\tau_i - \exp[-(p-1)T_{\text{п}}/\tau_i]}{(\exp T_{\text{и}}/\tau_i - 1)(\exp T_{\text{пач}}/\tau_i - 1)} + \right.$$

$$\left. \left. + \frac{1 - \exp[-(p-1)T_{\text{п}}/\tau_i]}{\exp T_{\text{п}}/\tau_i - 1} \right] + 1 \right\} \times$$

$$\times [1 - \exp(-t_{\text{и}}/\tau_i)]. \qquad (5.3.12)$$

Выражение (5.3.8) можно представить в виде

$$P = \frac{U_{\text{п.п}} C_i}{T_{\text{п}}} (N_{i1} + N_{i2} \cdot N_{i4}), \qquad (5.3.13)$$

где

$$N_{i4} = \frac{\exp T_{\text{п}}/\tau_i \{\exp[-(s-1)T_{\text{пач}}/\tau_i] - 1\} + \exp[-(p-1)T_{\text{пач}}/\tau_i]}{\exp T_{\text{пач}}/\tau_i - 1} \times$$

$$\times \{\exp T_{\text{пач}}/\tau_i - \exp[-(s-1)T_{\text{пач}}/\tau_i]\}.$$

В данном случае коэффициенты N_{i1} и N_{i2} имеют то же значение, что и выше; N_{i4} коэффициент, учитывающий параметры s и p для i-го релаксатора и не за-

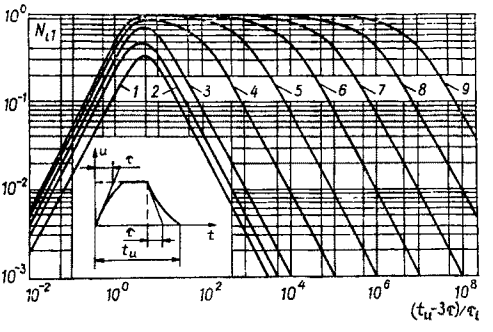


Рис. 5.3.4. Зависимость коэффициента N_{i1} от $\frac{t_{\text{и}}-3\tau}{\tau}$ (кривые 1–9) и $\frac{t_{\text{и}}-3\tau}{\tau_i}$ при воздействии на релаксатор трапецеидального импульсного напряжения с экспоненциальным законом изменения напряжения на фронтах импульса (τ — постоянная времени экспоненты)

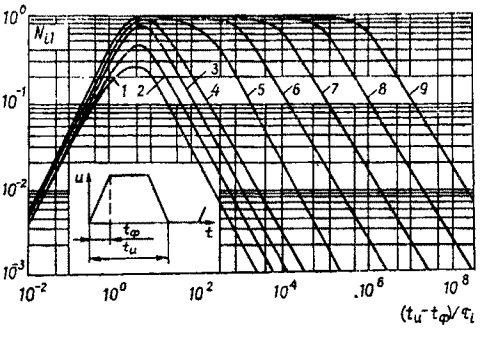


Рис. 5.3.5. Зависимость N_{i1} от $\frac{t_{\text{и}}}{t_{\text{ф}}}$ (кривые 1–9) и $\frac{t_{\text{и}}-t_{\text{ф}}}{\tau_i}$ при воздействии на релаксатор трапецеидального импульсного напряжения с линейным законом изменения напряжения на фронтах импульса (рис. 5.1.2, *б*) и $t_{\text{ф1}} = t_{\text{ф2}} = t_{\text{ф}}$

висящий от формы импульсного напряжения.

Для упрощения расчетов P выражения N_{i1}, соответствующие разным формам импульсного напряжения (для случаев, когда $t_{ф1}=t_{ф2}=t_ф$), на рис. 5.3.4—5.3.6 представлены в виде семейства кривых $N_{i1}=f\left(\frac{t_и-t_ф}{\tau_i}\right)$.

Для кривых *1—9* на рис. 5.3.4 и 5.3.6 значения $\frac{t_и-3\tau}{\tau}$ и $\frac{t_и-t_ф}{t_ф}$ соответственно равны 1; 5; 10; 10^2; 10^3; 10^4; 10^6; 10^7; на рис. 5.3.5 — соответственно 1; 2; 5; 10; 10^2; 10^3; 10^4; 10^5; 10^6. При $t_{ф1}\neq t_{ф2}$ определение коэффициента N_{i1} производится приближенно: раздельно для $t_{ф1}$ и для $t_{ф2}$, а затем вычисляется его среднеарифметическое значение. С помощью приведенных семейств кривых, рассчитанных на ЭВМ, легко определяется коэффициент N_{i1} для различных соотношений параметров импульсного напряжения, действующего на единичный релаксатор.

Приведенными семействами кривых можно пользоваться при расчете P и в случае несимметричных импульсов напряжения. Выражение для P при этом необходимо представить в виде

$$P=\frac{U_{п.п}^2 C_i}{4}\left(\frac{N_{i5}}{t_и-t_{ф2}}+\frac{N_{i6}}{T_п-t_и+t_{ф2}}\right), \qquad (5.3.14)$$

где N_{i5}, N_{i6} — коэффициенты, характеризующие потери в i-м релаксаторе при данной форме импульсного напряжения соответственно на временных участках импульсного напряжения $t_и-t_{ф2}$ и $T_п-t_и+t_{ф2}$. Эти коэффициенты определяются по кривым рис. 5.3.4—5.3.6.

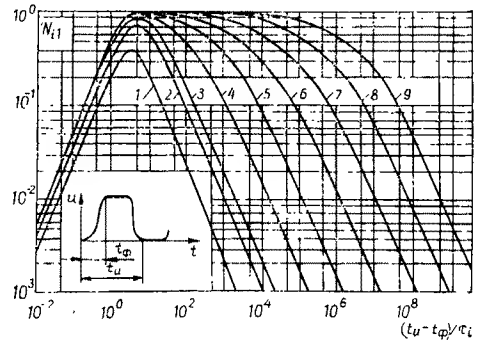


Рис. 5.3.6. Зависимость N_{i1} от $\frac{t_и-t_ф}{t_ф}$ (кривые *1—9*) и $\frac{t_и-t_ф}{\tau_i}$ при воздействии на релаксатор трапецеидального импульсного напряжения с косинусоидальным законом изменения напряжения на фронтах (рис. 5.1.2) при $t_{ф1}=t_{ф2}=t_ф$

Анализ выражений для мощности потерь энергии, полученных в работах [В.11, 5.8—5.11], показывает, что при оценке числа экспоненциальных составляющих, которые должны быть учтены при расчете, необходимо сравнивать их постоянные времени с параметрами воздействующего на конденсатор напряжения. При учете членов с малой постоянной времени достаточно остановиться на таком, который имеет $\tau_{i\,min}$, соизмеримую с длительностью фронта или спада импульсного напряжения (в зависимости от того, какая из них наименьшая), а при учете членов с большей постоянной времени на таком, который имеет $\tau_{i\,max}$, соизмеримую с периодом следования импульсов напряжения. Практика показывает, что в большинстве случаев достаточно учесть три—шесть экспоненциальных членов; при этом погрешность расчета не превышает 10—15%.

В приложении 2 приведены формулы для расчета коэффициента N_{i1} при других формах напряжения в установившихся и N_{i2} — в переходных режимах.

Приближенная оценка энергии тепловыделения в конденсаторах, работающих в импульсных режимах, может быть выполнена по формуле

$$W=\frac{CU^2}{2}\frac{r_{sэ}}{r_{sэ}+r_{вн}},$$

где $r_{вн}$ — активное сопротивление внешней по отношению к конденсатору цепи.

Мощность тепловыделения при этом составит

$$P=\frac{W}{T_п}=Wf_п. \qquad (5.3.15)$$

Здесь необходимо иметь в виду, что для снижения погрешности расчета P и W по приведенным формулам необходимо значения $r_{sэ}$ и $r_{вн}$ определять на частоте $f\approx\frac{1}{2t_и}$, где $t_и$ — длительность импульса тока.

§ 5.4. Расчет температурного поля конденсаторов

Рассматривается задача определения стационарного теплового поля конденсатора при его заданных геометрических и теплофизических характеристиках. Стационарное распределение температуры в анизотропной неоднородной среде описывается уравнением теплопроводности, которое в инвариантной форме имеет вид

$$\operatorname{div}(\lambda,\ \operatorname{grad}T)+q=0. \qquad (5.4.1)$$

В декартовых (x, y, z) и цилиндрических координатах (r, φ,z) уравнение (5.4.1) эквивалентно следующим выражениям:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q=0; \qquad (5.4.2)$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda_r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(\lambda_\varphi\frac{\partial T}{\partial\varphi}\right)+$$

$$+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q=0. \qquad (5.4.3)$$

Производительность внутренних источников тепла q является известной функцией координат, но может зависеть и от температуры. Коэффициенты теплопроводности λ в области G, занимаемой конденсатором, являются кусочно-постоянными функциями координат, хотя решение с помощью предлагаемой ниже численной методики может быть получено и при произвольных зависимостях λ от координат и температуры. На границах раздела сред с различными теплофизическими свойствами предполагается наличие совершенного теплового контакта, что означает непрерывность температуры и теплового потока:

$$T\Big|_\Gamma^+ = T\Big|_\Gamma^-;\ \lambda_n^+\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_\Gamma^+ = \lambda_n^-\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_\Gamma^-, \qquad (5.4.4)$$

где n — направление нормали к поверхности раздела Г.

В качестве условий однозначности для уравнения (5.4.2) или (5.4.3) кроме (5.4.4) используются граничные условия I рода, которые заключаются в том, что задается распределение температуры на наружной поверхности конденсатора, или граничные условия III рода, учитывающие теплообмен с окружающей средой:

$$-\lambda_n\frac{\partial T_к}{\partial n}=\alpha(T_к-T_0). \qquad (5.4.5)$$

Здесь n—направление нормали к внешней поверхности конденсатора; α — коэффициент теплоотдачи; $T_к$ — температура на корпусе конденсатора; T_0 — температура окружающей среды.

Заметим, что коэффициент α может зависеть от координат, температуры и других факторов. Зависимость α от температуры может иметь, в частности, следующий вид [4.4]:

$$\alpha=\alpha_н\left(\frac{T_к-T_0}{20}\right)^{1/4},$$

где $\alpha_н$ — начальное значение α при $T=20°C$.

В [5.12—5.36] описаны аналитические методы теплового расчета конденсаторов при различных режимах нагружения и эксплуатации. С помощью этих методов, отличающихся друг от друга комплексом принятых допущений и используемым математическим аппаратом, был решен ряд частных задач, многие из которых помимо теоретического значения представляют важный практический интерес.

По принципу электротепловой аналогии [5.37] построим однородную консервативную разностную схему для численного определения стационарного теплового поля конденсатора при произвольных значениях исходных данных. Однородность схемы означает, что ее коэффициенты вычисляются по единообразным формулам, вид которых не зависит от координат. Консервативные схемы выражают сеточные аналоги законов сохранения, что позволяет получать приемлемые для инженерной практики результаты на сравнительно грубых сетках. Непосредственная дискретизация уравнений (5.4.2)—(5.4.5) с использованием тейлоровских разложений не позволяет получать разностные схемы, обладающие свойством однородности и консервативности.

На рис. 5.4.1 в плоскости rz изображена расчетная схема цилиндрического конденсатора, для температурного поля которого будем предполагать наличие круговой симметрии (симметрии по φ). Для каждой из пяти областей, на которые разбивается объем конденсатора, задаются осевые коэффициенты теплопроводности λ_r и λ_z.

Область $0\leqslant r\leqslant d$, $|z|\leqslant l$, $0\leqslant\varphi<2\pi$, которую занимает конденсатор цилиндрической формы, разобьем на элементарные ячейки со сторонами h_{ri}, h_{zk} вдоль координатных осей r и z ($i=1, 2, ..., N$; $k=1, 2, ..., M$). Элементарные ячейки представляют собой тороиды с прямоугольным сечением (рис. 5.4.2). Разбиение производится таким образом, чтобы границы раздела сред с различными коэффициентами теплопроводности совпадали с границами ячеек. Образуем сетку Ω, узлами которой являются точки пересечения координатных поверхностей

$$r_0=-\frac{h_{r1}}{2};\ r_1=\frac{h_{r1}}{2};$$

$$r_i=r_{i-1}+\frac{h_{r,\,i-1}+h_{ri}}{2}\ (i=2, 3,..., N);$$

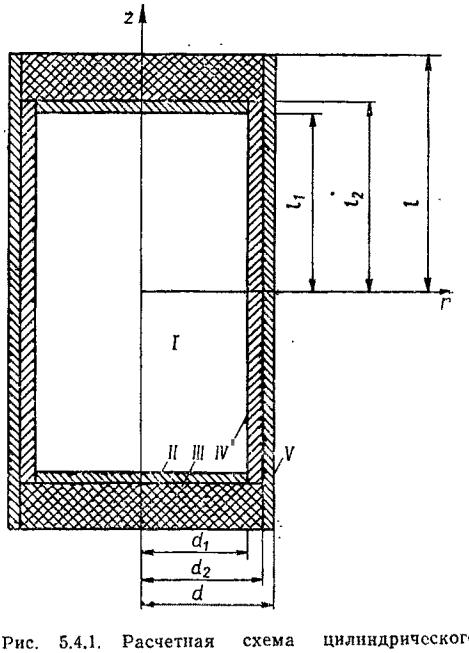


Рис. 5.4.1. Расчетная схема цилиндрического конденсатора

$$z_0 = -l;\ z_1 = \frac{h_{z1} - 2l}{2};$$

$$z_k = z_{k-1} + \frac{h_{z,\,k-1} + h_{zk}}{2}\ (k = 2, 3, \ldots, M).$$

Температуру T, коэффициенты λ_r и λ_z, удельную мощность тепловыделения q в точке $(r_i,\ z_k)$ обозначим соответственно через T_{ik}, λ_{rik}, λ_{zik}, q_{ik}.

Для построения разностной схемы введем следующие вспомогательные величины:

$$R_i = \frac{\pi}{4}\left[(2r_i + h_{ri})^2 - (2r_{i-1} + h_{r,\,i-1})^2\right]$$

— площадь кольца тороида (рис. 5.4.2);

$$R^{\pm}_{rik} = \frac{h_{ri}}{2\pi\lambda_{rik}\,(2r_i \pm h_{ri}/2)\,h_{zk}}$$

— эквивалентные тепловые сопротивления элементарной ячейки в направлении оси r (рис. 5.4.2);

$$R_{zik} = \frac{h_{zk}}{2\lambda_{zik} R_i}$$

— эквивалентные тепловые сопротивления элементарной ячейки в направлении оси z (рис. 5.4.2);

$$\beta^{-}_{rik} = \frac{1}{R^{-}_{rik} + R^{+}_{r,\,i-1,k}};$$

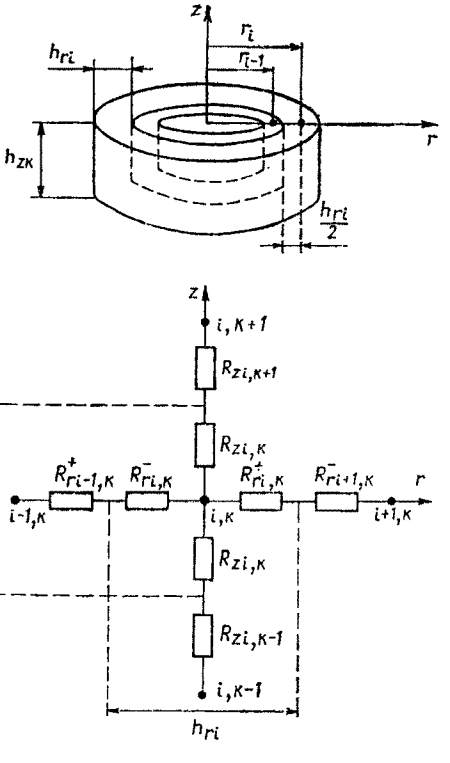


Рис. 5.4.2. Дискретная модель температурного поля цилиндрического конденсатора

$$\beta^{+}_{rik} = \frac{1}{R^{+}_{rik} + R^{-}_{r,\,i+1,\,k}}$$

— эквивалентные межузловые тепловые проводимости в направлении r;

$$\beta^{-}_{zik} = \frac{1}{R_{zik} + R_{zi,\,k-1}};$$

$$\beta^{+}_{zik} = \frac{1}{R_{zik} + R_{zi,\,k+1}}$$

— эквивалентные межузловые тепловые проводимости в направлении z;

$$\gamma_{ik} = \beta^{-}_{rik} + \beta^{+}_{rik} + \beta^{-}_{zik} + \beta^{+}_{zik}$$

— эквивалентная узловая тепловая проводимость.

Мощность тепловыделения в элементарной ячейке с номером $(i,\ k)$ вычисляется по формуле $P_{ik} = q_{ik} h_{zk} R_i$.

Если известно распределение температуры на корпусе конденсатора, то величины R^{-}_{r}, R^{+}_{r}, R_z в узлах, расположенных на внешней поверхности, принимаем равными нулю. При численном моделировании III краевой задачи для этих величин имеем

$$R^{-}_{r,\,N+1,\,k} = 1/(\alpha_{N+1,\,k}\, 2\pi d h_{zk});$$

$$R_{zi0} = 1/(\alpha_{i0} R_i);$$

$$R_{zi,\,M+1} = 1/(\alpha_{i,\,M+1} R_i).$$

Конечно-разностные соотношения по аналогии с выражениями для узловых потенциалов во внутренних узлах сетки с учетом симметрии принимают вид

$$\gamma_{ik} T_{ik} = P_{ik} + \beta^{-}_{rik} T_{i-1,\,k} + \beta^{+}_{rik} T_{i+1,\,k} + \beta^{-}_{zik} T_{i,\,k-1} + \beta^{+}_{zik} T_{i,\,k+1}; \quad (5.4.6)$$

$$T_{0k} = T_{1k};\ i = 1, 2, \ldots, N;\ k = 1, 2, \ldots M.$$

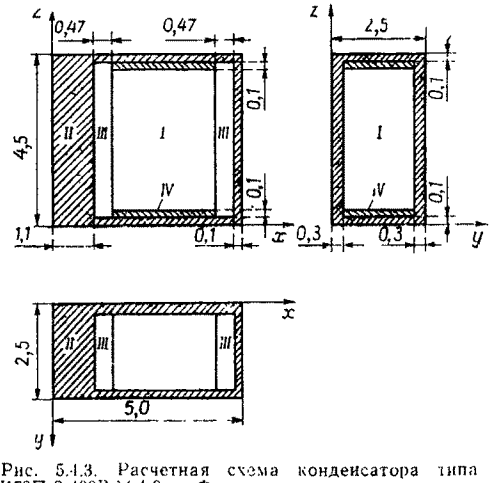


Рис. 5.4.3. Расчетная схема конденсатора типа К73П 2-400В × 4,0 мкФ

Аналогичным образом строится трехмерная разностная схема для расчета теплового поля конденсатора прямоугольной формы, который в декартовой системе координат занимает область $0 \leqslant x \leqslant a$, $0 \leqslant y \leqslant b$, $0 \leqslant z \leqslant c$. На рис. 5.4.3 в трех проекциях показана расчетная схема конденсатора К73П-2-400В-4,0 мкФ, которая является типичной для конденсаторов призматической формы. Линейные размеры даны в сантиметрах, а размерность коэффициентов теплопроводности $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Разобьем область G на прямоугольные ячейки со сторонами h_{xi}, h_{yj}, h_{zk} ($i=1, 2, \ldots, N$; $j=1, 2, \ldots, J$; $k=1, 2, \ldots, M$) вдоль координатных осей x, y, z. Узлами сетки Ω являются точки пересечения координатных плоскостей:

$$x_0 = 0,\ x_1 = \frac{h_{x1}}{2},\ x_i = x_{i-1} + \frac{h_{xi} + h_{x,\,i-1}}{2}\ (i=1, 2, \ldots, N),\ x_{N+1} = a;$$

$$y_0 = 0,\ y_1 = \frac{h_{y1}}{2},\ y_j = y_{j-1} + \frac{h_{yj} + h_{y,\,j-1}}{2}\ (j=1, 2, \ldots, J),\ y_{J+1} = b;$$

$$z_0 = 0,\ z_1 = \frac{h_{z1}}{2},\ z_k = z_{k-1} + \frac{h_{zk} + h_{z,\,k-1}}{2}$$

$$(k = 1, 2, \ldots, M),\ Z_{M+1} = C.$$

В точке с координатами (x_i, y_j, z_k) величины T, λ_x, λ_y, λ_z, q обозначаются соответственно через T_{ijk}, λ_{xijk}, λ_{yijk}, λ_{zijk}, q_{ijk}.

Для построения разностной схемы вводятся величины:

$$R_{xijk} = \frac{h_{xi}}{2\lambda_{xijk} h_{yj} h_{zk}};\quad R_{yijk} = \frac{h_{yj}}{2\lambda_{yijk} h_{xi} h_{zk}};$$

$$R_{zijk} = \frac{h_{zk}}{2\lambda_{zijk} h_{xi} h_{yj}}$$

— эквивалентные тепловые сопротивления элементарной ячейки в направлении осей x, y, z (рис. 5.4.4);

$$\beta^{-}_{xijk} = \frac{1}{R_{xijk} + R_{x,\,i-1,\,jk}},$$

$$\beta^{+}_{xijk} = \frac{1}{R_{xijk} + R_{x,\,i+1,\,jk}}$$

— эквивалентные межузловые тепловые проводимости вдоль оси x;

$$\beta^{-}_{yijk} = \frac{1}{R_{yijk} + R_{yi,\,j-1,\,k}}$$

$$\beta^{-}_{yijk} = \frac{1}{R_{yijk} + R_{yi,\,j-1,\,k}}$$

— эквивалентные межузловые тепловые проводимости вдоль оси y;

$$\beta^{-}_{zijk} = \frac{1}{R_{zijk} + R_{zij,\,k-1}},$$

$$\beta^{+}_{zijk} = \frac{1}{R_{zijk} + R_{zij,\,k+1}}$$

— эквивалентные межузловые тепловые проводимости вдоль оси z;

$$\gamma_{ijk} = \beta^{-}_{xijk} + \beta^{+}_{xijk} + \beta^{-}_{yijk} + \beta^{+}_{yijk} + \beta^{-}_{zijk} + \beta^{+}_{zijk}$$

— эквивалентная узловая проводимость;

$$P_{ijk} = q_{ijk} h_{xi} h_{yj} h_{zk}$$

— мощность тепловыделения в ячейке с номером (i, j, k).

При известной температуре корпуса в граничных узлах $R_x = R_y = R_z = 0$. Для III краевой задачи имеем

$$R_{x0jk} = \frac{1}{\alpha_{0jk} h_{yj} h_{zk}},$$

$$R_{x,\,N+1,\,jk} = \frac{1}{\alpha_{N+1\ jk} h_{yj} h_{zk}};$$

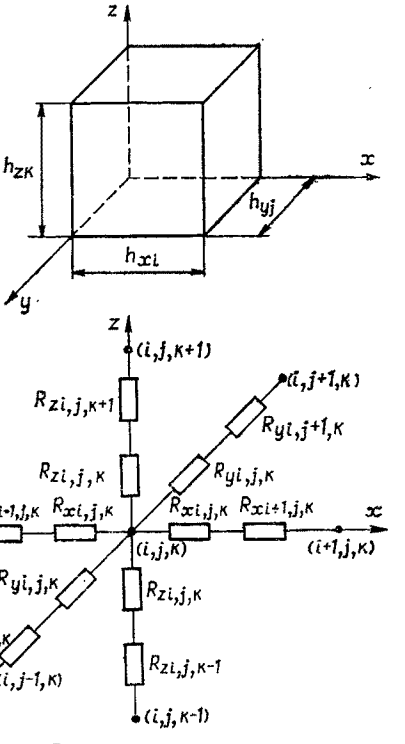


Рис. 5.4.4. Дискретная модель температурного поля прямоугольного конденсатора

$$R_{yi0k} = \frac{1}{\alpha_{i0k}\, h_{xi}\, h_{zk}},$$

$$R_{yi,\, J+1,\, k} = \frac{1}{\alpha_{i,\, J+1,\, k} h_{xi}\, h_{zk}};$$

$$R_{zij0} = \frac{1}{\alpha_{ij0}\, h_{xi} h_{yj}},$$

$$R_{zij,\, M+1} = \frac{1}{\alpha_{ij,\, M+1}\, h_{xi}\, h_{yj}}.$$

Конечно-разностные выражения для внутренних узлов сетки записываются в виде

$$\gamma_{ijk} T_{ijk} = P_{ijk} + \beta^{-}_{xijk} T_{i-1,\, jk} +$$
$$+ \beta^{+}_{xijk} T_{i+1,\, jk} + \beta^{-}_{yijk} T_{i,\, j-1,\, k} +$$
$$+ \beta^{+}_{yijk} T_{i,\, j+1,\, k} + \beta^{-}_{zijk} T_{ij,\, k-1} +$$
$$+ \beta^{+}_{zijk} T_{ij,\, k+1}; \qquad (5.4.7)$$

$i=1, 2,..., N$; $j=1, 2,..., M$; $k=1, 2,..., M$.

При решении I краевой задачи в качестве граничной температуры используется температура корпуса конденсатора $T_к$, а при решении III краевой задачи — температура окружающей среды T_0.

Системы линейных алгебраических уравнений (5.4.6) и (5.4.7) решались методом последовательной верхней релаксации [5.38]. С целью ускорения сходимости итерационных процессов с помощью вычислительных экспериментов были определены оптимальные итерационные параметры. Для системы (5.4.6), решение которой дает значения температур в конденсаторе цилиндрической формы, оптимальным является значение итерационного параметра, равное 1,4. Для системы (5.4.7) равно 1,55.

Исследовалась внутренняя сходимость обеих разностных схем на последовательности измельчающихся сеток. В результате серии вычислительных экспериментов было установлено, что разность между двумя последующими численными решениями в соответствующих узлах сетки стремится к нулю. Точное аналитическое решение модельной задачи сопоставлялось с приближенным сеточным решением. Максимальная относительная погрешность не превышала 5%. Такая точность для трехмерной задачи на сетке 16×12×12 была достигнута благодаря консервативности разностной схемы. Использование схем, не обладающих свойством консервативности, на грубых сетках приводит к появлению фиктивных источников энергии, что существенно искажает реальное распределение температуры.

В случае зависимости плотности тепловыделения от температуры $q=q(T)$ для определения установившегося теплового поля конденсатора используется метод последовательных приближений [5.3.9]. Суть его заключается в том, что, задав начальное распределение плотности источников тепла по объему конденсатора, рассчитывается его температурное поле. Затем исходя из полученных значений температуры в каждой ячейке корректируется мощность тепловыделения и снова рассчитывается тепловое поле конденсатора. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет найдено установившееся распределение температуры.

Если зависимость q от температуры немонотонная, то значения мощности тепловыделения в каждой ячейке следует определять по формуле

$$q = \eta q(T_{m-1}) + (1-\eta)\, q(T_m),$$

где $0 \leqslant \eta \leqslant 1$; m — номер внешней итерации.

Использование стабилизирующего множителя позволяет ускорить сходимость и преодолеть неустойчивость итерационного процесса, связанную с появлением осцилляций. Для монотонно возрастающих зависимостей $q(T)$ можно полагать $\eta=0$. Аналогичным образом организовывается итерационный процесс для III краевой задачи, когда коэффициент α зависит от температуры.

При достаточно большом начальном тепловыделении итерационный процесс может оказаться расходящимся, т. е. будет наблюдаться неограниченный рост температуры. Это означает, что не существует устойчивого теплового режима и наступает тепловая нестабильность конденсатора. Критическое значение удельной мощности тепловыделения можно находить методом деления отрезка пополам.

С помощью вычислительных экспериментов исследовалось влияние числа внешних итераций на точность решения. Для расчета установившегося теплового поля необходимо провести 10—15 итераций даже для режимов, близких к критическому.

Специально проведенные исследования показали, что, несмотря на формально первый порядок аппроксимации построенных разностных схем при использовании нерегулярных (неравномерных) сеток, погрешность численного решения по сравнению с точным решением не превышает 5%. Расчетные значения совпадают с экспериментальными данными в пределах 10—15%. Это расхождение обусловлено в основном тем, что исходные теплофизические параметры нельзя измерить точно.

На основе изложенного метода построены численные алгоритмы, которые реализованы в виде универсальных программ на языке ФОРТРАН-IV. В приложении 4 приведены распечатки программ и некоторые результаты расчетов стационарных тепловых полей серийно выпускаемых конденсаторов. Время расчета одного линейного варианта температурного поля на ЭВМ ЕС-1022 составляет не более 2—3 мин.

Численное моделирование тепловых режимов электрических конденсаторов, осуществляемое с помощью разработанной методики, с довольно высокой точностью позволяет:

— эффективно рассчитывать стационарные тепловые поля конденсаторов и, в частности, их тепловые сопротивления*) при различных режимах нагружения и эксплуатации;

— выполнять анализ влияния неравномерности тепловыделения локальных источников тепла, конструкции (размеров областей) и технологических разбросов теплофизических параметров на распределение температуры [5.40];

— осуществлять определение реальных теплофизических параметров, критических тепловых режимов и других режимных характеристик [5.41].

Численный метод расчета температурного поля конденсатора сравнительно легко обобщается при расчете нестационарных режимов и может быть использован для исследования многих других физических процессов и явлений, которые описываются квазилинейными уравнениями теплопроводности.

§ 5.5. Расчет максимальных и средних температур конденсаторов

Во многих практических случаях при оценке работоспособности конденсатора в том или ином режиме электрического и теплового нагружения необходимо знать максимальную и среднюю температуры конденсатора. Знание этих величин позволит обоснованно подойти к оценке максимально допустимых параметров электрической и тепловой нагрузок. Величина максимальной внутренней температуры непосредственно влияет на ресурс конденсатора, в то время как значение средней внутренней температуры используется для расчета мощности тепловыделения в конденсаторах с резко выраженной температурной зависимостью tgδ и C (см. § 5.3). В этой связи погрешность определения данных температур должна быть минимальной. Так, например, для конденсаторов с органическим диэлектриком изменение максимальной температуры внутри конденсатора (температуры теплового центра) на 8—10°С может привести к двойному изменению его ресурса (см. § 4.6). Знание среднеповерхностной температуры корпуса конденсатора необходимо разработчикам РЭА для расчета теплового режима различных блоков РЭА, одним из составных элементов которых является конденсатор. В последнем случае важно знать колебания рассматриваемых температур во времени при различных условиях электрического нагружения.

В дальнейшем для циклического теплового режима рассчитываются минимальные Θ_{min}, максимальные Θ_{max} и средние $\Theta_{ср}$ за цикл значения превышений (относительно температуры окружающей среды) рассматриваемых температур T_m, T_c, $T_к$.

Для расчета температур конденсатора используется метод, базирующийся на принципе электротепловой аналогии, широко применяемой при математическом моделировании задач теплопроводности [4.12]. Воспользуемся эквивалентной тепловой схемой конденсатора, приведенной на рис. 4.4.1 (см. § 4.4). В стационарном тепловом режиме температура конденсатора определяется соотношением (§ 4.4):

$$T = T_0 + P \cdot R_т. \qquad (5.5.1)$$

При подстановке в (5.5.1) $R_{тm}$, $R_{тc}$, $R_{тп}$ получим соответственно максимальную T_m, среднюю по объему T_c и среднюю по поверхности корпуса $T_к$ температуру конденсатора. В ряде случаев тепловой режим конденсатора может быть нестационарным (переходным) и квазистационарным (см. § 5.1).

Рассмотрим прерывистый циклический режим теплового нагружения конденсатора (см. § 5.1). Зависимость мощности тепловыделения показана на рис. 5.1.10, *в*:

$$P(t) = \begin{cases} P_m = \text{const при } 0 \leqslant t \leqslant t_р; \\ 0 \qquad\qquad \text{при } t_р < t \leqslant T_ц; \\ P_m = \text{const при } T_ц < t \leqslant T_ц + t_р; \\ 0 \qquad\qquad \text{при } T_ц + t_р < t \leqslant 2T_ц \text{ и т. д.} \end{cases} \qquad (5.5.2)$$

Превышение температуры (максимальной, средней, среднеповерхностной) конденсатора в этом случае находится из соотношения [4.12]:

$$\vartheta(t) = P_m R_т(t), \qquad (5.5.3)$$

где $R_т(t) = R_т(1 - e^{-t/\tau_т})$; $\vartheta(t) = T(t) - T_0$; $T(t)$ — текущее значение температуры конденсатора. Для промежутка времени $0 \leqslant t \leqslant t_р$, когда действует первый импульс мощности,

$$\vartheta_1(t) = P_m R_т \left(1 - e^{-t/\tau_т}\right). \qquad (5.5.4)$$

Для промежутка времени $t_р < t \leqslant T_ц$

$$\vartheta_2(t) = P_m R_т \left(e^{t_р/\tau_т} - 1\right) e^{-t/\tau_т} = P_m R_т A e^{-t/\tau_т}, \qquad (5.5.5)$$

где $A = \left(e^{t_р/\tau_т} - 1\right)$. В переходном (нестационарном) тепловом режиме, когда действует конечное число импульсов n, выражения (5.5.4) и (5.5.5) принимают соответственно вид

$$\vartheta_1(t) = P_m R_т \left[A \frac{1 - e^{-nT_ц/\tau_т}}{e^{T_ц/\tau_т} - 1} \times e^{-t/\tau_т} + \left(1 - e^{-t/\tau_т}\right)\right]; \qquad (5.5.6)$$

$$\vartheta_2(t) = \frac{P_m R_т}{e^{T_ц/\tau_т} - 1} \times e^{-t/\tau_т} \left[A\left(e^{T_ц/\tau_т} - e^{-nT_ц/\tau_т}\right)\right]. \qquad (5.5.7)$$

*) Вычислительные эксперименты показали, что внутреннее тепловое сопротивление является устойчивой индивидуальной характеристикой конденсатора и малые погрешности в задании исходных геометрических и теплофизических характеристик незначительно влияют на его значение.

Таблица 5.5.1

Тепловой режим конденсатора		Параметр и условия теплового режима	Расчетные соотношения
Длительный	Стационарный	$3 \leqslant \frac{t_р}{\tau_т}$; $\frac{t_п}{\tau_т} < 0{,}05$	$\Theta_{max} \cong \Theta_{min} \cong \Theta_{ср} \cong P_m R_т$
	Квазистационарный	$3 \leqslant \frac{t_р}{\tau_т}$; $0{,}05 \leqslant \frac{t_п}{\tau_т} < 3$	$\Theta_{max} \cong P_m R_т$; $\Theta_{min} \cong P_m R_т \cdot e^{-t_п/\tau_т}$; $\Theta_{ср} = P_m R_т \frac{t_р}{T_ц}$
		$3 \leqslant \frac{t_р}{\tau_т}$; $3 \leqslant \frac{t_п}{\tau_т}$	$\Theta_{max} \cong P_m R_т$; $\Theta_{min} > 0$; $\Theta_{ср} = P_m R_т \frac{t_р}{T_ц}$
Повторно-кратковременный	Стационарный	$\frac{t_р}{\tau_т} < 0{,}05$; $\frac{t_п}{\tau_т} < 0{,}05$	$\Theta_{max} \cong \Theta_{min} \cong \Theta_{ср} \cong P_m R_т \frac{t_р}{T_ц}$
	Квазистационарный	$\frac{t_р}{\tau_т} < 3$	$\Theta_{max} = P_m R_т \frac{1 - e^{-t_р/\tau_т}}{1 - e^{-T_ц/\tau_т}}$; $\Theta_{min} = \Theta_{max} e^{-t_п/\tau_т}$;
		$0{,}05 \leqslant \frac{t_п}{\tau_т} < 3$	$\Theta_{ср} = P_m R_т \frac{t_р}{T_ц}$
Кратковременный	Квазистационарный	$\frac{t_р}{\tau_т} < 3$	$\Theta_{max} \cong P_m R_т (1 - e^{-t_р/\tau_т})$; $\Theta_{min} \to 0$; $\Theta_{ср} = P_m R_т \frac{t_р}{T_ц}$
		$3 \leqslant \frac{t_п}{\tau_т}$	

В квазистационарном тепловом режиме конденсатора ($n \to \infty$) получим для промежутка времени $0 \leqslant t \leqslant t_р$:

$$\vartheta_1(t) = P_m R_т \times$$

$$\times \left[\frac{e^{t_р/\tau_т} - e^{T_ц/\tau_т}}{e^{T_ц/\tau_т} - 1} e^{-t/\tau_т} + 1 \right]; \quad (5.5.8)$$

для промежутка времени $t_р < t \leqslant T_ц$:

$$\vartheta_2(t) = P_m R_т \times$$

$$\times \frac{(e^{t_р/\tau_т} - 1) e^{T_ц/\tau_т}}{e^{T_ц/\tau_т} - 1} e^{-t/\tau_т}. \quad (5.5.9)$$

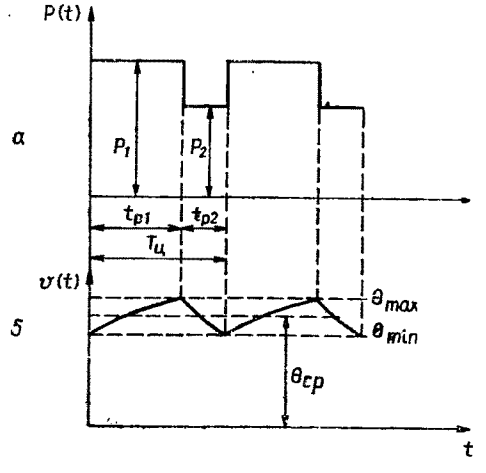


Рис. 5.5.1. Зависимость от времени мощности тепловыделения (*а*) и температуры (*б*) в непрерывном циклическом режиме теплового нагружения конденсатора

Из этих соотношений максимальное и минимальное за цикл превышения температур конденсатора (максимальной, средней — внутренней и среднеповерхностной) над температурой окружающей среды равны:

при $t = t_р$:

$$\Theta_{max} = P_m R_т \frac{1 - e^{-t_р/\tau_т}}{1 - e^{-T_ц/\tau_т}}; \quad (5.5.10)$$

при $t = T_ц$:

$$\Theta_{min} = P_m R_т \frac{1 - e^{-t_р/\tau_т}}{1 - e^{-T_ц/\tau_т}} e^{-\frac{T_ц - t_р}{\tau_т}}. \quad (5.5.11)$$

В соответствии с классификацией, принятой в § 5.1, при различных сочетаниях отношений длительности работы и паузы к тепловой постоянной времени конденсатора характер теплового режима конденсатора может быть разным.

В табл. 5.5.1 приведены расчетные формулы для максимальных Θ_{max}, минимальных Θ_{min} и средних $\Theta_{ср}$ за цикл теплового воздействия превышений температур конденсатора при различных условиях прерывистого теплового воздействия. Величи-

Тепловой режим конденсатора		Параметр и условия теплового режима	Расчетные соотношения	
Длительный	Стационарный	$3 < \frac{t_{p1}}{\tau_т}; \frac{t_{p2}}{\tau_т} < 0{,}05$	$\Theta_{max} \cong \Theta_{min} \geq \Theta_{ср} - P_1 R_т$	
	Квазистационарный	$3 \leqslant \frac{t_{p1}}{\tau_т}$; $0{,}05 \leqslant \frac{t_{p2}}{\tau_т} < 3$	$\Theta_{max} \simeq P_1 R_т$; $\Theta_{min} \simeq$ $\simeq R_т [(P_1 - P_2) e^{-t_{p2}/\tau_т} + P_2]$	$\Theta_{ср} = R_т \frac{P_1 t_{p1} + P_2 t_{p2}}{T_ц}$
		$3 \leqslant \frac{t_{p1}}{\tau_т}$; $3 \leqslant \frac{t_{p2}}{\tau_т}$	$\Theta_{max} \cong P_1 R_т$; $\Theta_{min} \simeq P_2 R_т$	
Повторно-кратковременный	Стационарный	$\frac{t_{p1}}{\tau_т} < 0{,}05$; $\frac{t_{p2}}{\tau_т} < 0{,}05$	$\Theta_{max} \cong \Theta_{min} \simeq \Theta_{ср} \cong R_т \frac{P_1 t_{p1} + P_2 t_{p2}}{T_ц}$	
	Квазистационарный	$\frac{t_{p1}}{\tau_т} < 3$; $0{,}05 \leqslant \frac{t_{p2}}{\tau_т} < 3$	$\Theta_{max} = R_т [P_1 (1 - e^{-t_{p1}/\tau_т}) + P_2 (e^{-t_{p1}/\tau_т} - e^{-T_ц/\tau_т})] / 1 - e^{-T_ц/\tau_т}$; $\Theta_{min} = R_т [P_1 (e^{-t_{p2}/\tau_т} - e^{-T_ц/\tau_т}) + P_2 (1 - e^{-t_{p2}/\tau_т})] / 1 - e^{-T_ц/\tau_т}$;	$\Theta_{ср} = R_т \frac{P_1 t_{p1} + P_2 t_{p2}}{T_ц}$
Кратковременный	Квазистационарный	$\frac{t_{p1}}{\tau_т} < 3$; $3 \leqslant \frac{t_{p2}}{\tau_т}$	$\Theta_{max} \cong R_т [P_1 (1 - e^{-t_{p1}/\tau_т}) + P_2 e^{-t_{p1}/\tau_т}]$ $\Theta_{min} \to P_2 R_т$;	$\Theta_{ср} = R_т \frac{P_1 t_{p1} + P_2 t_{p2}}{T_ц}$
		$\frac{t_{p1}}{\tau_т} < 0{,}05$; $3 \leqslant \frac{t_{p2}}{\tau_т}$	$\Theta_{max} = R_т \left[P_1 \frac{t_{p1}}{\tau_т} + P_2 \left(1 - \frac{t_{p1}}{\tau_т}\right) \right]$; $\Theta_{min} \to P_2 R_т$	$\Theta_{ср} = R_т \frac{P_1 t_{p1} + P_2 t_{p2}}{T_ц}$

на среднего за цикл превышения температуры определяется выражением

$$\Theta_{ср} = \frac{1}{T_ц} \int_0^{T_ц} \vartheta(t)\, dt. \qquad (5.5.12)$$

С учетом уравнений (5.5.8) и (5.5.9) получаем

$$\Theta_{ср} = \frac{1}{T_ц} \left[\int_0^{t_p} \vartheta_1(t)\, dt + \int_{t_p}^{T_ц} \vartheta_2(t)\, dt \right] = P_m R_т \frac{t_p}{T_ц}. \qquad (5.5.13)$$

В приведенных расчетных соотношениях для Θ_{max}, Θ_{min}, $\Theta_{ср}$ при подстановке в них величин $R_{тm}$, $R_{тс}$, $R_{тн}$ (см. § 4.4) можно определить максимальное, минимальное и среднее за цикл $T_ц$ превышение соответственно максимальной (T_m), средней ($T_с$) внутренней и среднеповерхностной ($T_к$) температур конденсатора в случае прерывистого теплового режима.

На практике имеет место непрерывный, но сложный тепловой режим нагружения конденсатора, например, когда мощность тепловыделения изменяется ступенчато по закону, как показано на рис. 5.5.1:

$$P(t)=\begin{cases}P_1=\text{const}\\ \text{при } 0\leqslant t\leqslant t_{p1};\\ P_2=\text{const}\\ \text{при } t_{p1}<t\leqslant T_{ц};\\ P_1=\text{const}\\ \text{при } T_{ц}<t\leqslant T_{ц}+t_{p1};\\ P_2=\text{const}\\ \text{при } T_{ц}+t_{p1}<t\leqslant 2T_{ц} \text{ и т. д.}\end{cases} \quad (5.5.14)$$

Для этого случая в переходном режиме получим следующие расчетные соотношения:

для промежутка времени $nT_{ц}<t\leqslant (nT_{ц}+t_{p1})$

$$\vartheta_{p1}(t)=P_1R_{т}-R_{т}\left\{P_2e^{-nT_{ц}/\tau_{т}}+\right.$$

$$+\frac{(P_1-P_2)}{e^{T_{ц}/\tau_{т}}-1}\left[\left(e^{T_{ц}/\tau_{т}}-1\right)-\right.$$

$$\left.\left.-\left(e^{t_{p}/\tau_{т}}-1\right)\left(1-e^{-nT_{ц}/\tau_{т}}\right)\right]\right\}; \quad (5.5.15)$$

для промежутка времени $nT_{ц}+t_{p1}<t\leqslant (nT_{ц}+T_{ц})$

$$\vartheta_{p2}(t)=P_2R_{т}+R_{т}\left[(P_1-P_2)\left(e^{t_{p1}/\tau_{т}}-1\right)\times\right.$$

$$\left.\times\frac{1-e^{(1-n)T_{ц}/\tau_{т}}}{1-e^{-T_{ц}/\tau_{т}}}-P_2e^{-nT_{ц}/\tau_{т}}\right]. \quad (5.5.16)$$

В квазистационарном тепловом режиме конденсатора

для промежутка времени $0\leqslant t\leqslant t_{p1}$

$$\vartheta_{p2}(t)=P_1R_{т}-$$

$$-R_{т}(P_1-P_2)\frac{1-e^{-t_{p2}/\tau_{т}}}{1-e^{-T_{ц}/\tau_{т}}}e^{-t/\tau_{т}}; \quad (5.5.17)$$

для промежутка времени $t_{p1}\leqslant t\leqslant T_{ц}$

$$\vartheta_{p2}(t)=P_2R_{т}+$$

$$+R_{т}(P_1-P_2)\frac{e^{t_{p1}/\tau_{т}}-1}{1-e^{-T_{ц}/\tau_{т}}}e^{-t/\tau_{т}}. \quad (5.5.18)$$

Максимальное и минимальное превышения температуры конденсатора за цикл теплового воздействия соответственно имеют вид

$$\Theta_{max}=\frac{R_{т}}{1-e^{-T_{ц}/\tau_{т}}}\left[P_1\left(1-e^{-t_{p1}/\tau_{т}}\right)+\right.$$

$$\left.+P_2\left(e^{-t_{p1}/\tau_{т}}-e^{-T_{ц}/\tau_{т}}\right)\right]; \quad (5.5.19)$$

$$\Theta_{min}=\frac{R_{т}}{1-e^{-T_{ц}/\tau_{т}}}\left[P_1\left(e^{-t_{p2}/\tau_{т}}-e^{-T_{ц}/\tau_{т}}\right)+\right.$$

$$\left.+P_2\left(1-e^{-t_{p2}/\tau_{т}}\right)\right]. \quad (5.5.20)$$

Расчетные формулы для максимального Θ_{max}, минимального Θ_{min} и среднего $\Theta_{ср}$ за цикл $T_{ц}$ превышений температур (T_m, $T_с$, $T_к$) конденсатора в случае непрерывного теплового режима приведены в табл. 5.5.2.

Примеры расчета

Прерывистый циклический тепловой режим (см. табл. 5.5.1).

1. Дано. Конденсатор типа К75-10-250В-1,0 мкФ. Полное среднее тепловое сопротивление (см. приложение 3)

$$R_{т.с}=32\frac{К}{Вт}.$$

Тепловая постоянная времени $\tau_{т}=600$ с. Режим теплового нагружения: $t_{р}=2400$ с; $t_{п}=20$ с; $T_{ц}=2420$ с; $P_m=1{,}0$ Вт; $T_{о}=40°С$.

Определить: а) максимальное за цикл значение среднеобъемной температуры $(T_{с})_{max}$ и ее превышение над температурой окружающей среды Θ_{max}; б) среднее за цикл значение среднеобъемной температуры $(T_{с})_{ср}$ и ее превышение над температурой окружающей среды $\Theta_{ср}$; в) минимальное за цикл значение среднеобъемной температуры $(T_{с})_{min}$ и ее превышение над температурой окружающей среды Θ_{min}. Определяем $\frac{t_{р}}{\tau_{т}}$ и $\frac{t_{п}}{\tau_{т}}$; $\frac{t_{р}}{\tau_{т}}=\frac{2400}{600}=4$; $\frac{t_{п}}{\tau_{т}}=\frac{20}{600}=\frac{1}{30}$. В этом случае тепловой режим конденсатора оказывается длительным стационарным. Находим

$$\Theta_{max}\cong\Theta_{ср}\cong\Theta_{min}=P_mR_{т.с}=1\cdot32=32\ К;$$

$$(T_{с})_{max}\cong(T_{с})_{ср}\cong(T_{с})_{min}=32+40=72°С.$$

2. Дано. Конденсатор типа К75-10-250В-1,0 мкФ. Режим теплового нагружения: $t_{р}=10$ с; $t_{п}=5$ с; $T_{ц}=15$ с; $P_m=1$ Вт; $T_{о}=40°С$.

Определить Θ_{max}, $\Theta_{ср}$, Θ_{min}, $(T_{с})_{max}$, $(T_{с})_{ср}$, $(T_{с})_{min}$; $\frac{t_{р}}{\tau_{т}}=\frac{10}{600}=\frac{1}{60}$;

$$\frac{t_{п}}{\tau_{т}}=\frac{5}{600}=\frac{1}{120}.$$

В этом случае тепловой режим конденсатора повторно-кратковременный стационарный. Находим

$$\Theta_{max}\cong\Theta_{min}\cong\Theta_{ср}=P_m\,R_{т.с}\,\frac{t_{р}}{T_{ц}}=$$

$$=1\cdot32\cdot\frac{10}{15}\cong21\ К;$$

$$(T_{с})_{max}=(T_{с})_{ср}=(T_{с})_{min}=$$

$$=21+40=61°С.$$

3. Дано. Конденсатор типа К75-10-250В-1,0 мкФ. Режим теплового нагруже-

ния: $t_р = 600$ с; $t_ц = 120$ с; $T_ц = 720$ с; $P_m = 1$ Вт; $T_о = 40°C$.

Определить Θ_{max}, $\Theta_{ср}$, Θ_{min}, $(T_с)_{max}$, $(T_с)_{ср}$, $(T_с)_{min}$:

$$\frac{t_р}{\tau_т} = \frac{600}{600} = 1; \quad \frac{t_п}{\tau_т} = \frac{120}{600} = 0{,}2.$$

В данном случае тепловой режим конденсатора повторно-кратковременный квазистационарный. Находим

$$\Theta_{max} = P_m R_{т.с} \frac{1 - e^{-t_р/\tau_т}}{1 - e^{-T_ц/\tau_т}} =$$

$$= 1 \cdot 32 \frac{1 - e^{-1}}{1 - e^{-1,2}} \cong 29\,K;$$

$$\Theta_{ср} = P_m R_{т.с} \frac{t_р}{T_ц} = 1 \cdot 32 \cdot \frac{600}{720} \cong 27K;$$

$$\Theta_{min} = \Theta_{max} e^{-t_п/\tau_т} = 29e^{-0,2} \simeq 24\,K;$$

$(T_с)_{max} = 69°C$; $(T_с)_{ср} = 67°C$;

$(T_с)_{min} = 64°C$.

Непрерывный циклический тепловой режим (см. табл. 5.5.2).

4. Дано. Конденсатор типа К75-10-250 В-1,0 мкФ. Режим теплового нагружения; $t_{р1} = 3000$ с; $t_{р2} = 120$ с; $T_ц = 3120$ с; $P_1 = 2$ Вт; $P_2 = 0{,}5$ Вт; $T_о = 40°C$.

Определить Θ_{max}, $\Theta_{ср}$, Θ_{min}, $(T_с)_{max}$, $(T_с)_{ср}$, $(T_с)_{min}$:

$$\frac{t_{р1}}{\tau_т} = \frac{3000}{600} = 5; \quad \frac{t_{р2}}{\tau_т} = \frac{120}{600} = 0{,}2.$$

В этом случае тепловой режим конденсатора длительный квазистационарный. Находим

$$\Theta_{max} \cong P_1 R_{т.с} = 2 \cdot 32 = 64K;$$

$$\Theta_{min} \cong R_{т.с} \left[(P_1 - P_2) e^{-t_{р2}/\tau_т} + P_2\right] =$$

$$= 32 \left[1{,}5\, e^{-0,2} + 0{,}5\right] \cong 55K;$$

$$\Theta_{ср} = R_{т.с} \frac{P_1 t_{р1} + P_2 t_{р2}}{T_ц} =$$

$$= 32 \frac{2 \cdot 3000 + 0{,}5 \cdot 120}{3120} = 62K;$$

$(T_с)_{max} = 104°C$; $(T_с)_{ср} = 102°C$;

$(T_с)_{min} = 95°C$.

5. Дано. Конденсатор типа К75-10-250 В-10 мкФ. Режим теплового нагружения: $t_{р1} = 30$ с; $t_{р2} = 1500$ с; $T_ц = 1530$ с; $P_1 = 4$ Вт; $P_2 = 0{,}5$ Вт; $T_о = 70°C$.

Определить Θ_{max}, $\Theta_{ср}$, Θ_{min}, $(T_с)_{max}$, $(T_с)_{ср}$, $(T_с)_{min}$: $\frac{t_{р1}}{\tau_т} = \frac{30}{600} = 0{,}05$; $\frac{t_{р2}}{\tau_т} = \frac{1500}{600} = 2{,}5$; $\frac{T_ц}{\tau_т} = \frac{1530}{600} = 2{,}55$.

В этом случае тепловой режим конденсатора повторно-кратковременный квазистационарный. Находим

$$\Theta_{max} = 32 \frac{4\left(1 - e^{-0,05}\right) + 0{,}5\left(e^{-0,05} - e^{-2.55}\right)}{1 - e^{-2,55}} \cong 22K;$$

$$\Theta_{min} = 32 \frac{4\left(e^{-2,5} - e^{-2,55}\right) + 0{,}5\left(1 - e^{-2,5}\right)}{1 - e^{-2,55}} \simeq 15K;$$

$$\Theta_{ср} = 32 \frac{4 \cdot 30 + 0{,}5 \cdot 1500}{1530} \cong 18K;$$

$(T_с)_{max} = 92°C$; $(T_с)_{ср} = 88°C$;

$(T_с)_{min} = 85°C$.

6. Дано. Конденсатор типа К75-10-250 В-10 мкФ. Режим теплового нагружения: $t_{р1} = 1200$ с; $t_{р2} = 3600$ с; $T_ц = 4800$ с; $P_1 = 3$ Вт; $P_2 = 1$ Вт; $T_о = 20°C$.

Определить Θ_{max}, Θ_{min}, $\Theta_{ср}$, $(T_с)_{max}$, $(T_с)_{min}$, $(T_с)_{ср}$:

$$\frac{t_{р1}}{\tau_т} = \frac{1200}{600} = 2; \quad \frac{t_{р2}}{\tau_т} = \frac{3600}{600} = 6.$$

В этом случае тепловой режим конденсатора кратковременный квазистационарный. Находим

$$\Theta_{max} \cong 32[3(1 - e^{-2}) + 1\, e^{-2}] \cong 87\ K;$$

$$\Theta_{min} \cong 1 \cdot 32 = 32\ K;$$

$$\Theta_{ср} = 32 \frac{3 \cdot 1200 + 1 \cdot 3600}{4800} \cong 48K;$$

$(T_с)_{max} = 107°C$; $(T_с)_{ср} = 68°C$;

$(T_с)_{min} = 52°C$.

Глава 6. Основные условия обеспечения работоспособности конденсаторов

§ 6.1. Влияние теплового режима на работоспособность конденсаторов

В результате наложения внутренних и внешних тепловых воздействий в конденсаторе возникает определенный тепловой режим (см. § 5.1), характеризующийся пространственно-временным распределением температуры. Это распределение может быть таким, что конденсатор окажется либо неработоспособным, либо показатели его долговечности будут недостаточными.

Поэтому для обеспечения работоспособности и требуемой надежности конденсаторов необходимо, чтобы в заданных условиях эксплуатации их тепловой режим был допустим [В.1, В.6, В.11, В.12, 6.1].

Нарушения работоспособности конденсатора могут быть вызваны:

а) недопустимо большой средней мощностью тепловыделения и действующим значением тока, приводящими к тепловому или электротепловому пробою конден-

Таблица 6.1.1

Конденсаторы	$K_з$ при $\tau_ч$, ч		
	10^3	10^4	10^5
Металлобумажные	1,1—1,2	1,4—1,7	2,0—2,5
Бумажно фольговые с жидкой пропиткой	1,05—1,10	1,1—1,2	1,4—1,9
Металлопленочные лавсановые, полистирольные, полипропиленовые	1,05—1,10	1,1—1,2	1,2—1,3
Бумажно-полипропиленовые, пропитанные хлордифенилами	1,05—1,10	1,05—1,10	1,05—1,10

сатора (см. § 4.5, 4.6), к локальным перегревам конструкции или даже к перегоранию внутренних предохранителей;

б) недопустимо большими температурными градиентами в конструкции конденсатора, приводящими к его термомеханическому разрушению (это характерно для монолитных конструкций конденсаторов, например керамических [В.1, В.16, В.17]) или же к их разгерметизации;

в) недопустимо большой энергией импульсного тепловыделения, приводящей к термическому разрушению металлизированных обкладок в зоне контактного узла [В.11].

Сокращение ресурса конденсаторов происходит из-за процесса термического старения конструкции, в первую очередь диэлектрика и металлизированных обкладок (см. § 4.6), обусловленного внутренней температурой, развивающейся в конденсаторе. Таким образом, для обеспечения работоспособности и необходимой долговечности конденсаторов, исходя из термических механизмов отказов и старения, следует ограничить значения тепловых и электрических нагрузок:

$$P \leqslant \frac{P_{кр}}{K_з}; \qquad (6.1.1)$$

$$T_m \leqslant T_{mд}; \qquad (6.1.2)$$

$$\Theta_m \leqslant \Theta_{mд}; \qquad (6.1.3)$$

$$I \leqslant I_д; \qquad (6.1.4)$$

$$W \leqslant W_д, \qquad (6.1.5)$$

где $P_{кр}$ — критическая мощность тепловыделения; $K_з$ — коэффициент запаса (см. табл. 6.1.1); $T_{mд}$ — предельно допустимая максимальная внутренняя температура; $I_д$ — предельно допустимое действующее значение тока через конденсатор; $\Theta_{mд}$ — предельно допустимое превышение температуры теплового центра конденсатора над температурой охлаждающей среды; $W_д$ — предельно допустимая энергия импульсного тепловыделения в переходном сопротивлении контактного узла конденсаторов с металлизированными обкладками.

На практике обычно требуется определение предельно допустимых электрических и тепловых нагрузок для совокупности конденсаторов, т. е. с учетом разброса индивидуальных параметров и характеристик.

Предельно допустимая мощность тепловыделения в конденсаторах определяется из условий обеспечения:

1) тепловой стабильности конденсатора $P_д = \dfrac{P_{кр}}{K_з}$ (здесь $P_{кр}$ — критическая мощность тепловыделения конденсаторов в начале их эксплуатации);

2) максимальной внутренней температуры не более предельно допустимого значения $T_{mд}$;

3) максимального превышения температуры теплового центра конденсатора не более предельно допустимого значения $\Theta_{mд}$.

Определение критической мощности тепловыделения рассмотрено в § 4.5. Выполнение условия (6.1.1) обеспечивает тепловую стабильность конденсаторов с сильной температурной зависимостью мощности тепловыделения (с бумажным, лавсановым, комбинированным диэлектриком и др.) в течение их срока службы.

Значение коэффициента запаса $K_з$ зависит от стабильности во времени температурной характеристики фактора потерь конденсатора ($C \cdot \mathrm{tg}\delta$) и необходимого ресурса конденсаторов.

В табл. 6.1.1 приведены ориентировочные значения минимальных коэффициентов запаса $K_з$ для конденсаторов различных конструкций и 90%-ных гамма-ресурсов τ_γ при эксплуатации конденсаторов в простых непрерывных режимах нагружения.

В сложных режимах нагружения (см. § 5.1) допустимая мощность тепловыделения по условию обеспечения тепловой стабильности конденсаторов определяется путем расчета на ЭВМ температурного поля конденсаторов, задавая последовательно значения удельной мощности тепловыделения (см. § 5.4; приложение 5).

Ограничение мощности тепловыделения необходимо из условия обеспечения не только тепловой стабильности основной массы конденсаторов в конце срока службы, но и определенного ресурса конденсаторов при термическом и термоионизационном механизме старения (6.1.2) [В.1, В.6, 6.1)].

Так, в случае, когда в конденсаторе имеют место длительный стационарный или квазистационарный тепловые режимы (см. § 5.1), предельно допустимая средняя за цикл работы мощность тепловыделения составит

$$P_д = \frac{T_{mд} - T_{0max}}{R_{Tm}}, \qquad (6.1.6)$$

где $T_{0\,max}$ — максимальная температура

Таблица 6.1.2

Конденсаторы	$T_{тд}$, °С		
	$\tau_{\gamma} = 10^3$ ч	$\tau_{\gamma} = 10^4$ ч	$\tau_{\gamma} = 10^5$ ч
Металлобумажные	110—115	85—90	60—65
Бумажно-фольговые с пропиткой:			
нефтяным маслом	85—90	70—75	60—65
хлордифенилами	110—115	95—100	80—85
Полиэтилентерефталатные (лавсановые)	115—135	100—110	75—85
Поликарбонатные	105—115	95—105	75—85
Полипропиленовые	100—105	90—100	70—85
Полистирольные (пленка САМП)	90—100	85—95	60—80
Фторопластовые фольговые	130—140	100—120	90—95
Бумажно-лавсановые металлизированные	105—115	95—105	70—80
Бумажно-полипропиленовые фольговые с пропиткой хлордифенилами	100—105	95—100	85—90
Бумажно-фторопластовые фольговые	100—105	95—100	85—90
С оксидным диэлектриком:			
алюминиевые*)	80—95	65—80	50—60
танталовые и ниобиевые оксидно-полупроводниковые*)	110—125	95—105	80—90

*) При номинальном напряжении.

окружающей среды; $R_{тт}$ — полное максимальное тепловое сопротивление конденсатора; $T_{тд}$ — предельно допустимая для заданного гамма-процентного ресурса конденсаторов максимальная температура внутри конденсаторов в начале эксплуатации.

Ориентировочные значения этой температуры для различных видов и типов конденсаторов при непрерывных простых режимах теплового нагружения приведены в табл. 6.1.2 для 90%-ного гамма-ресурса.

В режимах с квазистационарным или нестационарным температурным полем предельно допустимое значение максимальной температуры ограничено не только термическим старением диэлектрика конденсатора и обеспечением необходимого ресурса, но и требованием получения определенного запаса по кратковременной электрической прочности (см. § 6.2), а также допустимой термической усадкой диэлектрика.

Точные зависимости предельно допустимой максимальной внутренней температуры конденсаторов от ресурса в таких режимах на основании указанных требований неизвестны. Однако при оценке предельно допустимой мощности тепловыделения в этих режимах можно ориентироваться на наибольшую температуру в табл. 6.1.2. В простом прерывистом циклическом режиме теплового нагружения, когда в конденсаторе имеет место повторно-кратковременный стационарный тепловой режим работы, т. е. при $t_{и}/\tau_{т} < 0{,}05$ и $t_{р}/\tau_{к} < 0{,}05$ (см. § 5.1), предельно допустимая мощность тепловыделения составляет

$$P_{д} = \frac{T_{тд} - T_{0max}}{R_{тт}} \frac{1}{\text{ПВ}} = \frac{T_{тд} - T_{0max}}{R_{тт}} \frac{T_{ц}}{t_{р}}. \qquad (6.1.7)$$

Здесь значения $T_{тд}$ для различных конденсаторов те же, что и в случае непрерывных длительных режимов; повторность включения $\text{ПВ} = \dfrac{t_{р}}{T_{ц}}$.

Из выражения (6.1.7), в частности, следует, что в этом тепловом режиме предельно допустимая мощность тепловыделения на интервале работы в $T_{ц}/t_{р}$ раз превышает предельно допустимую мощность тепловыделения в случае длительного стационарного или квазистационарного теплового режима работы.

При повторно-кратковременном квазистационарном тепловом режиме работы, т. е. при $t_{р}/\tau_{т} < 3$ и $0{,}05 \leqslant t_{и}/\tau_{т} < 3$ (см. § 5.1), предельно допустимая средняя за время $t_{р}$ мощность потерь в конденсаторе находится по формуле

$$P_{д} = (T_{тд} - T_{0max})[1 - \exp(-T_{ц}/\tau_{т})]/R_{тт}[1 - \exp(-t_{р}/\tau_{т})]. \qquad (6.1.8)$$

В кратковременном тепловом режиме работы выражение для предельно допустимой средней за время $t_{р}$ мощности тепловыделения имеет вид

$$P_{д} = \frac{T_{тд} - T_{0max}}{R_{тт}[1 - \exp(-t_{р}/\tau_{т})]}. \qquad (6.1.9)$$

При кратковременном квазистационарном тепловом режиме в случае $t_{р} \ll \tau_{т}$ предельно допустимая мощность тепловыделения приближенно равна

$$P_{д} = \frac{T_{тд} - T_{0max}}{R_{тт}} \frac{\tau_{т}}{t_{р}}. \qquad (6.1.10)$$

В непрерывном циклическом режиме теплового нагружения, т. е. когда мощ-

ность тепловыделения периодически ступенчато изменяется на двух уровнях P_1 и P_2 ($P_2 > P_1$) (см. рис. 5.1.8) и в конденсаторе имеет место повторно-кратковременный квазистационарный тепловой режим работы при условии, что $P_1 R_{тm} < T_{тд} - T_{0\,max}$, предельно допустимая мощность тепловыделения P_2 составит

$$P_2 = \{(T_{тд} - T_{0max})[1 - \exp(-T_ц/\tau_т)] - P_1 R_{тm}[\exp(-t_{p2}/\tau_т) - \exp(-T_ц/\tau_т)]\}/R_{тm}[1 - \exp(-t_{p2}/\tau_т)]. \quad (6.1.11)$$

В данном случае предельно допустимая мощность тепловыделения на интервале работы t_{p2} зависит не только от соотношений $t_p/\tau_т$ и $T_ц/\tau_т$, но и от мощности тепловыделения на интервале работы t_{p1}.

Если в результате циклического непрерывного режима нагружения возникает длительный тепловой режим конденсатора, т. е. $t_{p2}/\tau_т > 3$, то предельно допустимая мощность тепловыделения P_2 рассчитывается по формуле (6.1.6), независимо от соотношения $t_{p1}/\tau_т$.

В случае, когда вследствие циклического изменения мощности тепловыделения на двух уровнях в конденсаторе имеет место повторно-кратковременный стационарный тепловой режим ($t_{p1}/\tau_т < 0{,}05$; $t_{p2}/\tau_т < 0{,}05$), предельно допустимая мощность тепловыделения определяется по формуле

$$P_2 = \frac{(T_{тд} - T_{0max})\,T_ц - P_1 R_{тm} t_{p1}}{R_{тm}\,t_{p2}},$$

где $T_ц = t_{p1} + t_{p2}$.

Если в циклическом непрерывном режиме нагружения возникает кратковременный тепловой режим ($t_{p2}/\tau_т < 3$, $t_{p1}/\tau_т \geqslant 3$), то предельно допустимая мощность тепловыделения на интервале работы T_{p2} составит

$$P_2 = \frac{(T_{тд} - T_{0max}) - P_1 R_{тm} \exp(-t_{p2}/\tau_т)}{R_{тm}\,[1 - \exp(-t_{p2}/\tau_т)]}.$$

По этой формуле, в частности, может быть определена предельно допустимая мощность при кратковременной перегрузке конденсатора. При этом величина $T_{тд}$ принимается максимальной из значений, приведенных в табл. 6.1.2.

Выполнение условия (6.1.3) необходимо для предотвращения недопустимых термомеханических напряжений в конструкциях конденсаторов [В.17].

Здесь также имеется различие в значениях допустимого максимального превышения температуры для длительных и повторно-кратковременных режимов работы. Большие по амплитуде и частые колебания температуры конденсатора из-за циклических термомеханических нагрузок приводят к усталостным явлениям. Предельно допустимое максимальное превышение температуры от числа температурных циклов устанавливают экспериментально. На практике выполнение этого условия обеспечивается ограничением мощности тепловыделения и действующего значения тока, предельно допустимые значения которых рассчитываются по формулам, приведенным в данном параграфе.

В нормативно-технической документации на некоторые типы высокочастотных керамических, стеклянных и слюдяных конденсаторов приводится предельно допустимое значение реактивной мощности $Q_д$, позволяющее определять предельно допустимое (в диапазоне рабочих температур) напряжение синусоидальной формы $U = \sqrt{Q_д/2\pi f C}$.

Такой подход косвенно ограничивает мощность тепловыделения ($P = Q \operatorname{tg}\delta$), однако конденсаторы при этом иногда недоиспользуются по допустимой мощности тепловыделения, так как не учитывается частотная зависимость $\operatorname{tg}\delta$.

Предельно допустимое действующее значение тока. Ограничение действующего значения тока через конденсатор [см. условие (6.1.4)] необходимо для предотвращения локальных перегревов конструкций конденсаторов, обусловленных локализацией тепловыделения (см. § 2.3).

Такая локализация может иметь место в выводах конденсаторов и контактных узлах.

Значение тока должно быть ограничено с учетом допустимых перегрузок по току для конденсаторов с внутренними предохранителями.

Выполнение условия (6.1.4) особенно существенно для конденсаторов с низкими потерями в диэлектрике (с неполярным пленочным диэлектриком) воздушных, вакуумных, керамических и других высокочастотных конденсаторов, а также конденсаторов, работающих при пульсирующем напряжении на повышенных частотах (электролитических, металлобумажных, лакопленочных, металлопленочных).

В оксидных конденсаторах действующее значение тока должно быть ограничено не только с учетом теплового режима конденсатора, но и в результате его влияния на электрохимические процессы разрушения. Весьма чувствительны к токовым нагрузкам, в частности, танталовые конденсаторы с серебряным корпусом, менее чувствительны — оксидно-полупроводниковые конденсаторы.

Предельно допустимое действующее значение тока через конденсатор зависит от его конструкции, номинальных значений емкости и напряжения, электрического режима (частоты, формы тока), теплового режима (распределения мощности и температуры по конденсатору, характера теплового режима), а также от условий охлаждения (температуры и скорости охлаждающего воздуха).

При определении предельно допустимого действующего значения тока учитывают не только значение максимальной внутренней температуры, допустимой из условия обеспечения запаса по кратковременной электрической прочности или же необходимого ресурса конденсатора, но и пространственно-временные температурные гра-

дисты температуры, о которых речь шла при определении предельно допустимой мощности тепловыделения.

В связи с тем, что предельно допустимое действующее значение тока зависит от многих факторов и такие зависимости достаточно сложны, на практике это значение задается обычно в виде табличных данных. Ориентировочные данные допустимых значений токов конденсаторов К75-10 при $T_{\text{о max}}=70$°С приведены в табл. 6.1.3 [В.11].

Предельно допустимое действующее значение тока конденсаторов с металлизированными обкладками часто определяется по предельно допустимому значению линейной плотности тока (на единицу длины обкладки), составляющей от 0,2 до 3—5 А/м для различных типов конденсаторов.

Для конденсаторов с металлизированными обкладками, имеющими довольно большой разброс эквивалентного последовательного активного сопротивления металлических частей конструкции $r_{\text{м}}$ (см. § 4.3), предельно допустимое действующее значение тока в длительном тепловом режиме должно определяться из условия достижения температуры в тепловом центре конденсатора, предельно допустимой при данном диэлектрике и гамма-процентном ресурсе температуры (табл. 6.1.2) для конденсаторов с наибольшим значением величины $r_{\text{м}}$. Поскольку температура теплового центра определяется не только джоулевыми потерями, но и потерями в диэлектрике, а также условиями охлаждения, предельно допустимое действующее значение тока более точно рассчитывается с применением методики расчета теплового поля (см. § 5.4).

Если предельно допустимое действующее значение тока через конденсатор ограничено из условия достижения предельно допустимого значения температуры выводов конденсаторов, то, зная предельно допустимое значение тока $I_{\text{д1}}$ при некоторой температуре охлаждающего воздуха $T_{\text{о max1}}$, предельно допустимое значение тока при другой температуре охлаждающей среды $T_{\text{о max2}}$ находим приближенно по формуле

$$I_{\text{д2}} = I_{\text{д1}} \left(\frac{T_{m\text{д.в}} - T_{\text{omax2}}}{T_{m\text{д.в}} - T_{\text{omax1}}} \right)^{1/4}. \quad (6.1.12)$$

Таблица 6.1.3

Емкость $C_{\text{н}}$, мкФ	Напряжение $U_{\text{н}}$, В	Диаметр D, мм	Длина L, мм	Ток $I_{\text{д}}$, А
1,5		28	55	4,5
2,2		32	55	4,5
3,3		28	95	4,5
4,7	250	32	95	6,0
6,8		38	95	8,0
10,0		48	95	12,0
0,47		28	65	4,5
0,68		32	65	5,0
1,00		30	95	5,0
1,50	500	38	95	8,0
2,20		40	115	8,5
3,30		48	115	12,0
0,15		26	65	4,0
0,22		30	65	4,5
0,33		34	65	6,0
0,47	750	34	95	6,0
0,68		40	95	8,5
1,00		48	95	12,0
1,50		50	115	13,0
0,15		26	95	4,0
0,22		32	95	4,5
0,33	1000	38	95	8,0
0,47		45	95	10,0
0,68		48	95	12,0
1,00		55	115	15,0

Здесь $T_{m\text{д.в}}$ — предельно допустимая температура выводов.

В табл. 6.1.4 приведены предельно допустимые действующие значения тока медных проволочных выводов конденсаторов при их горизонтальном положении, определенные для естественного воздушного охлаждения при $T_{m\text{д.в}}=100$°С.

Если предельно допустимое действующее значение тока через конденсатор ограничено допустимой температурой контактного узла или внутреннего предохранителя, то при изменении режима работы или условий охлаждения оно может быть приближенно рассчитано по формуле

$$I_{\text{д2}} = I_{\text{д1}} \sqrt{\frac{T_{m\text{д}} - T_2}{T_{m\text{д}} - T_1}}, \quad (6.1.13)$$

где $T_{m\text{д}}$ — предельно допустимая температура нагрева элемента конструкции (пре-

Таблица 6.1.4

Частота, кГц	Температура охлаждающего воздуха T_{omax}, °С											
	20			50			70			90		
	Диаметр вывода, мм											
	0,8	1,6	2,0	0,8	1,6	2,0	0,8	1.6	2,0	0,8	1,6	2,0
0—0,1	19	50	77	14	36	53	11	28	42	6	16	24
1	19	50	77	14	36	53	11	28	42	6	16	24
10	19	48	70	14	34	48	11	27	38	6	15	22
100	16	30	42	12	21	28	9	17	22	5	10	13

Таблица 6.1.5

Конструкция конденсатора	Место локального теплового выделения	Температура для первого и второго режимов
С внутренними предохранителями	Предохранитель	Наибольшая температура в районе расположения предохранителей
С металлизированными обкладками и лепестковыми выводами	Контактные узлы	Температура корпуса
С металлизированными обкладками и проволочными выводами	Выводы или контактные узлы	Температура выводов или корпуса
С фольговыми обкладками и вкладными контактами без внутренних предохранителей	Выводы или вкладные контакты	Среднеобъемная температура пакета секций
С фольговыми выступающими обкладками без внутренних предохранителей	Выводы или межсекционные соединительные пинки	Максимальная температура охлаждающей среды при естественном охлаждении. Температура корпуса в случае принудительного охлаждения

дохранителя, контактного узла, внутренних токоведущих проводников и т. д.); $I_{д1}$ — предельно допустимое действующее значение для первого режима (обычно это предельно допустимое действующее значение тока синусоидальной формы в непрерывном режиме работы для конденсаторов переменного тока).

В табл. 6.1.5 приведены основные виды конструкций конденсаторов с указанными местами расположения точек локального тепловыделения и температуры T_1 и T_2 при различных режимах. В технических условиях на конденсаторы с твердым неполярным диэлектриком и на вакуумные конденсаторы, у которых преобладают потери в металлической арматуре (выводах, контактных узлах и т. д.), при сильном проявлении поверхностного эффекта предельно допустимое действующее значение синусоидального тока определяется по формуле

$$I = \frac{K_I}{\sqrt[4]{f}},$$

где K_I — коэффициент, значение которого приводится в ТУ; f — частота тока.

У конденсаторов с металлизированными и фольговыми обкладками без внутренних плавких предохранителей предельно допустимое действующее значение тока при принудительном воздушном охлаждении возрастает, так как снижается наружное тепловое сопротивление (см. § 4.4).

Предельно допустимое действующее значение тока конденсатора в длительном режиме работы при принудительном воздушном охлаждении приближенно находится по формуле (6.1.13), для которой значение T_2 определяется с учетом снижения $R_{т.н}$ при принудительном воздушном охлаждении (см. § 4.4), т. е.

$$I_{д2} \approx I_{д1} \sqrt{\frac{T_{тд} - T_2}{T_{тд} - T_1}},$$

где T_1, T_2 — температура элемента конструкции по данным табл. 6.1.5 соответственно при естественном и принудительном воздушном охлаждении. Значения $I_{д1}$ и T_1 находятся с учетом максимальной температуры охлаждающего воздуха ($T_{о\,max}$) (см. табл. 6.1.4 и § 5.5).

Для конденсаторов, у которых основная доля тепла выделяется в выводах (см. § 2.3), в частности, у конденсаторов типа К72-11 на частотах, превышающих 10^4 Гц, предельно допустимое действующее значение тока при принудительном воздушном охлаждении приближенно определяется по формуле

$$I_{д2} = I_{д1} \sqrt{\frac{R_{н.в1}}{R_{н.в2}}},$$

где $I_{д1}$ — предельно допустимое действующее значение тока при естественном воздушном охлаждении, определяемое по формуле (6.1.13); $R_{н.в1}$, $R_{н.в2}$ — наружные тепловые сопротивления выводов соответственно при естественном и принудительном воздушном охлаждении. Для ориентировочных расчетов отношение этих сопротивлений может быть взято согласно данным рис. 4.4.7. Более точно оно может быть определено с учетом рекомендаций [4.11].

На рис. 6.1.1 приведены кривые зависимости кратности увеличения предельно допустимого действующего значения тока от скорости охлаждающего воздуха для конденсаторов различных конструкций, рассчитанные в соответствии с изложенными рекомендациями.

Наиболее эффективно применение принудительного воздушного охлаждения с целью получения большего предельно допустимого действующего значения тока для конденсаторов с выступающими фольговыми обкладками, у которых внутреннее тепловое сопротивление мало по сравнению с наружным (см. табл. 4.4.2).

Предельно допустимые действующие значения тока конденсаторов в повторно-

Таблица 6.1.6

Режим работы	Предельно допустимое действующее значение тока конденсатора $I_{д2}$	Номер формулы
Повторно-кратковременный: квазистационарный	$I_{д2} = I_{д1}\sqrt{\dfrac{1-\exp\left(-T_ц/\tau_т'\right)}{1-\exp\left(-t_р/\tau_т'\right)}}$	(1)
стационарный	$I_{д2} = I_{д1}\sqrt{\dfrac{T_ц}{t_р}}$	(2)
Кратковременный	$I_{д2} = I_{д1}\sqrt{\dfrac{1}{1-\exp\left(-t_р/\tau_т'\right)}}$	(3)
Циклический непрерывный режим нагружения	$I_{д\cdot р2} = \sqrt{\dfrac{\left[1-\exp\left(-T_ц/\tau_т'\right)\right] I_{д1}^2}{1-\exp\left(-t_{р2}/\tau_т'\right)} - \dfrac{I_{р1}^2\left[\exp\left(-t_{р2}/\tau_т'\right)\right]-\exp\left(-T_ц/\tau_т'\right)}{1-\exp\left(-t_{р2}/\tau_т'\right)}}$	(4)

Примечание. $I_{р1}$ — действующее значение тока конденсатора в интервале работы $t_{р1}$ при заданном режиме электрического нагружения; $I_{д\cdot р2}$ — предельно допустимое действующее значение тока в интервале работы $t_{р2}$.

кратковременных и кратковременных тепловых режимах работы могут быть рассчитаны по формулам из табл. 6.1.6, если известно предельно допустимое действующее значение тока в стационарном длительном тепловом режиме $I_{д1}$.

В формулы (табл. 6.1.6) следует подставлять значение $I_{д1}$, рассчитанное по формулам (6.1.12) и (6.1.13) с учетом предельно допустимой максимальной температуры элемента конструкции и лимитирующего фактора (табл. 6.1.5).

Здесь также необходимо учесть, что при локализации тепловыделения, в частности, при изменении положения теплового центра конденсатора, тепловая постоянная времени в формулах табл. 6.1.6 ($\tau_т'$) значительно меньше тепловой постоянной времени всего конденсатора $\tau_т$ при отсутствии локальных нагревов.

Так, для конденсаторов с металлизированными обкладками при расчете предельно допустимого действующего значения тока в прерывистых режимах величина $\tau_т'$ составляет 0,01—0,20 значения тепловой постоянной времени всего конденсатора (см. § 4.4). Меньшее значение относится к конденсаторам более крупных размеров с тонкими проволочными выводами.

Для конденсаторов с выводами в виде шпилек значения $\tau_т'$ составляют порядка 200—800 с в зависимости от их диаметра и длины.

Меньшие тепловые постоянные времени ($\tau_т'$ порядка 50—200 с) принимаются в случае, когда локальному нагреву подвергаются внутренние проводники, соединяющие секции между собой и с выводами.

Наименьшие тепловые постоянные времени (порядка единиц и десятых долей секунды) следует принимать при расчете предельно допустимых действующих значений тока в прерывистых режимах для конденсаторов с внутренними предохранителями.

Отметим, что рассмотренный выше подход в определении предельно допустимого действующего значения тока в повторно-кратковременном и кратковременном режимах весьма приближенный, поскольку расчетное значение тепловой постоянной времени $\tau_т'$ из-за зависимости скорости распространения тепловой волны от времени зависит от длительности работы $t_р$.

Предельно допустимая амплитуда импульсного тока. Особенностью учета этого ограничивающего режимного фактора

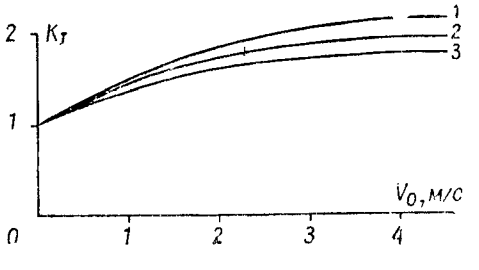


Рис. 6.1.1. Зависимость кратности увеличения предельно допустимого действующего значения тока в длительном режиме от скорости охлаждающего воздуха при T_{mg} =90°С, $T_{0\max}$=65°С для конденсаторов с фольговыми выступающими обкладками (*1*), с фольговыми скрытыми обкладками без внутренних предохранителей (*2*), с металлизированными обкладками (*3*)

Таблица 6.1.7

Тип конденсатора	$U_н$, В	$C_н$, мкФ	Г, МА·с$^{1/2}$/Ф	Конструкция конденсатора
К75-10	250	0,10—0,33	0,107	Цилиндрическая
		0,47—2,20	0,066	»
		3,3—10,0	0,030	»
	500	0,10—0,68	0,107	»
		1,0; 1,5	0,066	»
		2,2; 3,3	0,030	»
	750	0,10—0,33	0,170	»
		0,47—1,00	0,107	»
		1,5	0,050	»
	1000	0,10—0,47	0,170	»
		0,68; 1,0	0,107	»
К75-24	400	0,10—0,33	0,056	»
		0,47—4,7	0,037	»
		4,0—10,0	0,045	Прямоугольная
	630	0,10—0,33	0,075	Цилиндрическая
		0,47—2,20	0,049	»
		3,3; 4,7	0,027	»
		4,0—10,0	0,060	Прямоугольная
	1000	0,10; 0,15	0,100	Цилиндрическая
		0,22—1,00	0,066	»
		1,5; 2,2	0,036	»
		4,0—10,0	0,054	Прямоугольная
	1600	0,10—0,68	0,080	Цилиндрическая
		1,0; 1,5	0,044	»
		2,0—10,0	0,065	Прямоугольная
К73-11	160	2,70—6,80	0,027	Цилиндрическая
	250	0,047—0,120	0,130	»
		0,15—0,56	0,080	»
		0,68—2,20	0,040	»
	400	0,022—0,068	0,170	»
		0,082—0,330	0,100	»
		0,39—1,00	0,055	»
	630	0,0001—0,0270	0,250	»
		0,033—0,082	0,150	»
		0,18—0,47	0,080	»
К73П-2	400	0,0022—0,0100	0,033	»
		0,015—0,033	0,025	»
		0,047—0,330	0,017	»
		0,47; 0,68	0,010	»
		0,5; 1,0	0,020	Прямоугольная
		2,0—15,0	0,014	»
	630	0,001—0,068	0,049	Цилиндрическая
		0,010—0,022	0,038	»
		0,033—0,100	0,030	»
		0,15—0,47	0,020	»
		0,25; 0,50	0,040	Прямоугольная
		1,0—10,0	0,026	»
	1000	0,0047—0,0100	0,080	Цилиндрическая
		0,015—0,047	0,055	»
		0,068—0,330	0,038	Прямоугольная
		0,5—6,0	0,044	»
		8,0; 10,0	0,020	»
К71-4	160	1,2; 1,5	0,086	Цилиндрическая
		1,8—4,7	0,060	»
		5,6—10,0	0,047	»
	250	0,027—0,180	0,140	»
		0,22—1,00	0,086	»
К77-1	63	0,22—0,39	0,044	»
		0,47—2,20	0,025	»
		2,7—22,0	0,015	»
	100	0,10—0,22	0,075	»
		0,27—1,50	0,040	»
		1,8—3,9	0,027	»

Продолжение табл. 6.1.7

Тип конденсатора	$U_н$, В	$C_н$, мкФ	Г, мА·с$^{1/2}$/Ф	Конструкция конденсатора
	200	0,022—0,068	0,125	»
		0,082—0,390	0,070	»
		0,47—3,90	0,045	»
	400	0,0010—0,0047	0,340	»
		0,0056—0,0150	0,250	»
		0,018—0,100	0,140	»
		0,012—1,000	0,090	»
К77-2	40	0,22—1,80	0,025	Цилиндрическая
		2,2—8,2	0,015	»
		1,0—2,7	0,009	»
		3,3—100,0	0,006	»
	63	0,056—1,000	0,0044	»
		1,2; 2,2	0,025	»
		2,7—22,0	0,015	»
	100	0,010—0,047	0,075	»
		0,056—0,560	0,050	»
		0,68—2,70	0,030	»
		3,3—10,0	0,018	»
		12—22	0,010	»
К77-4	160	0,10—0,18	0,088	»
		0,22—0,68	0,050	»
		0,82—4,70	0,030	»
		5,6—15,0	0,020	»
		10,0; 20,0	0,030	Прямоугольная
К76П-1	63	0,47—2,20	0,018	Цилиндрическая
		3,3—22,0	0,010	»
К76-3	250	0,1—1,0	0,035	»
		1,2—10,0	0,020	»
К76-4	25	0,47—1,20	0,025	»
		1,5—3,9	0,010	»
		4,7—10,0	0,008	»
К42У-2	160	0,047—0,220	0,035	»
		0,33—1,00	0,020	»
	250	0,047—0,100	0,035	»
		0,15—0,47	0,020	»
		1,0	0,014	»
	400	0,033; 0,047	0,060	»
		0,068—0,330	0,035	»
		0,47	0,025	»
	630	0,015; 0,022	0,125	»
		0,033—0,022	0,075	»
	1000	0,01; 0,10	0,095	»
		0,15—0,22	0,065	«
	1600	0,0047—0,0470	0,140	»
		0,068—0,100	0,095	»

(6.1.5) является то, что допустимая энергия импульсного тепловыделения одна и та же для длительных, повторно-кратковременных и кратковременных режимов работы, в том числе и для режимов перегрузки, так как процесс нагрева слабого элемента конструкции при импульсном тепловыделении имеет адиабатический характер. Причем считается, что начальный нагрев этого элемента слабо влияет на данную энергию.

Значение предельно допустимой энергии импульсного тепловыделения в переходном сопротивлении контакта для конденсаторов с металлизированными обкладками непосредственно установить не удается из-за неопределенности значения этого сопротивления. Поэтому ограничение энергии импульсного тепловыделения в таких конденсаторах достигается путем ограничения амплитуды импульса тока через конденсатор в соответствии с формулой [В.11]:

$$I_{тд} = \frac{\Gamma C_н}{\sqrt{\tau_э}}, \qquad (6.1.14)$$

где $C_н$ — номинальная емкость конденсатора, Ф; Г — коэффициент, зависящий от типа и номинальных параметров конденсатора и определяемый экспериментально; $\tau_э$ — *энергетическая длительность импульса тока* (см. § 5.1).

Таблица 6.1.8

Тип конденсатора	Значение емкости $C_н$, мкФ; диаметр D, см; высота H, см корпуса конденсатора	Максимальное значение импульсного тока
К50-6; К50-16 К53-1Б; К53-18	—	0,02 МА/Ф
К53-15	—	0,05 МА/Ф
К53-1; К53-1А К53-10	—	0,10 МА/Ф
К52-2	10—80 мкФ	
К52-2В	100—1000 мкФ	
К52-5	6,8—33 мкФ 68—330 мкФ	
К52-1	0,3; 1,1	5А
К52-1Б	0,40; 1,45 0,46; 1,75 0,6; 2,0 0,75; 2,25	
К52-1А	—	

Значение коэффициента Г для некоторых типов конденсаторов приведено в табл. 6.1.7 [В.11].

Формула (6.1.14) для импульсов относительно большой длительности (более сотни микросекунд) дает заниженные значения предельно допустимой амплитуды, так как при таких длительностях процесс нагрева переходного сопротивления уже не будет адиабатическим.

Для конденсаторов с внутренними предохранителями допустимое импульсное тепловыделение определяется характеристикой I^2t этих предохранителей.

Если для конденсатора известны, например, форма и допустимое значение амплитуды импульсного тока I_{m1} при некотором $\tau_{э1}$, то при других длительностях и формах допустимая амплитуда импульсного тока может быть рассчитана по формуле

$$I_{m2} = I_{m1}\sqrt{\frac{\tau_{э2}}{\tau_{э1}}}, \qquad (6.1.15)$$

где $\tau_{э1}$ и $\tau_{э2}$ — энергетические длительности импульсов в первом и втором режимах.

Для конденсаторов с оксидным диэлектриком допустимую амплитуду импульсного тока иногда задают приближенно [В.11], независимо от длительности его протекания (табл. 6.1.8).

В импульсных конденсаторах большой энергии, имеющих фольговые обкладки, амплитуда импульсного тока должна ограничиваться также из условия ограничения импульса сил, действующих на элементы конструкции.

Если предельно допустимой принять амплитуду разрядного тока в номинальном режиме, то при других продолжительностях протекания импульса тока предельно допустимой будет амплитуда

$$I_m = I_{mн}\sqrt{t_{и.н}/t_и}, \qquad (6.1.16)$$

где $t_{и.н}$, $t_и$ — длительность импульса тока соответственно в номинальном и отличном от номинального режимах.

Пример 1. Необходимо определить предельно допустимую мощность тепловыделения и действующее значение тока в конденсаторе типа К75-10-250 В-10 мкФ в прерывистом циклическом режиме нагружения при следующих условиях: $T_ц = 10$, $t_р = 2$ мин, $\tau_ч = 10^4$ ч, охлаждение естественное воздушное при $T_{о\,max} = +40$°С.

Для этого конденсатора согласно данным табл. 3.1 приложения 3 $R_{т.с} = 13$ К/Вт, $\tau_т = 30$ мин. Из табл. 6.1.2 принимаем $T_{мд} = 105$°С. Учитывая связь между максимальным и средним полным тепловым сопротивлением для пропитанных конденсаторов с металлизированными обкладками [см. формулу (4.4.8) § 4.4, табл. 4.4.2], находим максимальное полное тепловое сопротивление этого конденсатора:

$$R_{тm} \approx 13 \cdot 1{,}2 = 15{,}6 \text{ К/Вт}.$$

Так как $t_р/\tau_т = 0{,}067$; $t_п/\tau_т = 0{,}266$, то конденсатор в заданном режиме нагружения будет работать в повторно-кратковременном квазистационарном тепловом режиме (см. табл. 5.1.4). Тогда по формуле (6.1.8) получим

$$P_д = \frac{(105-40)[1-\exp(-10/30)]}{15{,}6[1-\exp(-2/30)]} = 18 \text{ Вт}.$$

Согласно данным табл. 6.1.3 для этого конденсатора в непрерывном режиме при $T_{о\,max} = +70$°С допустимое действующее значение тока составляет 12 А. Поскольку для конденсаторов такой конструкции действующее значение тока ограничивается из условий допустимого нагрева контактного узла, то предельно допустимое действующее значение тока при $T_{о\,max} = +40$°С в прерывистом циклическом режиме находим с учетом формулы (6.1.13) и формулы (1) из табл. 6.1.6.

Тепловую постоянную времени нагрева контактного узла конденсатора с запасом примем равной 0,05 $\tau_т$, т. е. $\tau'_т = 1{,}5$ мин. Предельно допустимую температуру контактного узла будем считать равной предельно допустимой температуре диэлектрика, т. е. согласно табл. 6.1.2 для $\tau_ч = 10^4$ ч, $T_{мд} = 105$°С.

Средняя температура корпуса конденсатора в прерывистом циклическом режиме работы при $T_{о\,max} = +40$°С согласно данным § 5.5 составит

$$T_к = 40 + 18 \cdot 5 \cdot 2/10 = 58\text{°С},$$

где 5 К/Вт — наружное тепловое сопротивление конденсатора (см. рис. 4.4.2, § 4.4).

С учетом этих данных, а также формулы (6.1.13) и соотношения (1) из табл. 6.1.6 предельно допустимое действу-

ющее значение тока конденсатора для рассматриваемых условий равно

$$I_д = 12\sqrt{\frac{105-58}{105-85}\cdot\frac{1-\exp(-10/1{,}5)}{1-\exp(-2/1{,}5)}} = 21\text{А},$$

В формулу (6.1.13) подставлено значение $T_1 = 85°\text{С}$ — температуры корпуса в нормируемом ТУ режиме ($T_к = T_{o\,max} + 15 = 70 + 15 = 85°\text{С}$), так как допустимое превышение температуры корпуса по ТУ составляет 15°С. Значение $I_{д1}$ взято из табл. 6.1.3.

Пример 2. Необходимо определить для конденсатора К75-10-250В-10 мкФ предельно допустимую амплитуду импульса тока, имеющего форму половины волны синусоиды длительностью $t_ф = 50 \cdot 10^{-6}$ с.

Расчет производим по (6.1.14). Согласно данным § 5.1 при такой форме импульса тока $\tau_э = t_ф/2 = 25 \cdot 10^{-6}$ с. Коэффициент $\Gamma = 0{,}03$ МА·с$^{1/2}$/Ф находим из табл. 6.1.6. Тогда по (6.1.14)

$$I_{тд} = \frac{0{,}03 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{25 \cdot 10^{-6}}} = 60\text{ А}.$$

Приближенное определение предельно допустимых значений мощности тепловыделения и действующего значения тока конденсаторов. В настоящее время не для всех типов конденсаторов имеются все необходимые данные (тепловые сопротивления, максимально допустимые температуры) для определения значений этих величин. Ориентировочные значения можно получить, если рассчитать по кривой (она приводится в ТУ) зависимости от частоты допустимого рабочего напряжения мощность тепловыделения и действующее значение тока для ряда частот, а затем выбрать наибольшие значения.

При расчетах мощности тепловыделения следует использовать формулу (см. § 5.3), соответствующую форме напряжения режима ТУ.

Полученные таким образом данные предельно допустимой мощности и действующего значения тока конденсатора, естественно, будут соответствовать условиям охлаждения и ресурсу конденсатора, приведенным в ТУ.

Пример 3. Необходимо определить предельно допустимую мощность тепловыделения конденсатора типа К71-4-160В-10 мкФ. Используя данные § 5.2, 5.3, справочные данные по зависимости допустимого напряжения от частоты $U(f)$ при $\text{tg}\delta = 0{,}0015 = \text{const}$, находим P и I (табл. 6.1.9).

Таблица 6.1.9

Частота f, Гц	P, Вт	I, А	Частота f, Гц	P, Вт	I, А
550	0,58	3,7	$5 \cdot 10^3$	0,71	12,0
$1 \cdot 10^3$	0,62	5,1	$1 \cdot 10^4$	0,75	18,0
$2 \cdot 10^3$	0,76	8,0	$3 \cdot 10^4$	0,54	27,0
$3 \cdot 10^3$	0,80	10,0	$6 \cdot 10^4$	0,30	26,5

Из табл. 6.1.9 выбираем $P_д = 0{,}8$ Вт; $I_д = 27$ А. Для более точного расчета допустимой мощности тепловыделения здесь необходимо учитывать частотную зависимость тангенса угла потерь конденсатора (см. § 4.1, 4.3).

Иногда для конденсаторов в ТУ задан единственный (номинальный) режим. В данном случае в качестве предельно допустимых приходится брать значения мощности тепловыделения и тока в этом режиме.

Пример 4. В непрерывном длительном режиме необходимо определить предельно допустимую мощность тепловыделения в конденсаторе типа ПС-0,3-0,4 04.2 при естественном воздушном охлаждении $T_{o\,max} = 40°\text{С}$ с такими номинальными данными: $U_н = 300$ В, $f_н = 400$ Гц, $C_н = 50$ мкФ, $\text{tg}\delta \leqslant 4 \cdot 10^{-3}$. Используя эти данные, находим

$$P_д = 300^2 \cdot 2\pi \cdot 400 \cdot 50 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 45\text{ Вт};$$

$$I_д = 300 \cdot 2\pi \cdot 400 \cdot 50 \cdot 10^{-6} = 37{,}5\text{ А}.$$

Оценим предельно допустимую мощность тепловыделения в этом конденсаторе, используя данные табл. 6.1.2 и § 4.4.

По табл. 4.4.1, учитывая габариты и конструкцию конденсатора, принимаем $R_{тт} = 1{,}7$ К/Вт. Тогда предельно допустимая мощность тепловыделения согласно формуле (6.1.6) составит

$$P_д = \frac{95-40}{1{,}7} = 32{,}4\text{ Вт},$$

где $T_{тд} = 95°\text{С}$ (табл. 6.1.2) для $\tau_у = 10^4$ ч.

Из приведенного примера видно, что значение $P_д$, найденное по данным ТУ, выше, чем значение, определенное по формуле (6.1.6), из-за использования в первом случае максимального $\text{tg}\delta = 0{,}4 \cdot 10^{-3}$.

§ 6.2. Влияние характера и параметров воздействующего напряжения на работоспособность и долговечность конденсаторов

Чтобы обеспечить работоспособность конденсаторов, необходимо ограничивать не только их токи и мощность тепловыделения (см. § 6.1), но также и значение рабочего напряжения и перенапряжений, исходя из условий получения определенных запасов по их длительной и кратковременной электрической прочности (см. § 4.6).

При эксплуатации в конденсаторах происходят физические и химические процессы, приводящие к пробоям диэлектрика. Последние можно разделить на *электрические* [6.2] (чисто электрические, а также пробои под действием ЧР), *тепловые* (первого и второго рода — см. § 4.5, третьего рода — [2.3]), *термомеханические* [В.17] и *электрохимические*.

Вид возникающего пробоя зависит в основном от конструкции конденсатора, а также от характера и параметров воздействующего на него напряжения (табл. 6.2.1).

Таблица 6.2.1

Вид пробоя конденсатора	Основные условия возникновения пробоя	Виды конденсаторов
Чисто электрический	Значительная кратность перенапряжений	С органическим диэлектриком, вакуумные, газонаполненные, керамические, стеклянные, с оксидным диэлектриком
	Незначительная кратность перенапряжений	С оксидным диэлектриком
Под действием ЧР	Повышенные напряженности электрического поля при переменном напряжении, в том числе импульсном. Часто повторяющиеся перенапряжения сравнительно небольшой кратности. Пульсирующее напряжение с большой глубиной пульсации. Постоянное напряжение при повышенных температурах	С органическим диэлектриком, керамические, слюдяные
Электрохимический	Напряжение, содержащее постоянную составляющую, повышенные температуры, переменные напряжения низких и инфранизких частот	С органическим диэлектриком; керамические, титаносодержащие
Тепловой первого рода	Повышенные температуры, плохие условия охлаждения, повышенное тепловыделение	С полярным органическим диэлектриком, с неорганическим диэлектриком и с сильной зависимостью мощности тепловыделения от температуры
Тепловой второго и третьего рода	Повышенная температура внутри конденсаторов вследствие плохих условий охлаждения, повышенного тепловыделения или повышенной температуры окружающей среды	С неполярным органическим диэлектриком
Термомеханический	Большие температурные градиенты в хрупком диэлектрике	Керамические

В условиях эксплуатации пробои конденсаторов, как правило, возникают не сразу, а в результате процесса старения их рабочего диэлектрика (теплового или термического, электрохимического и под действием ЧР). Старение приводит к ухудшению электрических характеристик конденсаторов (увеличению $tg\delta$ и усилению его зависимости от температуры и частоты, изменению емкости, снижению сопротивления изоляции и кратковременной электрической прочности и т. д.).

Время развития указанных процессов старения и соответствующих форм пробоя (рис. 6.2.1) сильно зависит от вида (конструкции) конденсаторов и их параметров.

Исследования, выполненные в последние десятилетия, выявили существенную роль ЧР в процессе старения конденсаторов и влияние их интенсивности на работоспособность конденсаторов как на переменном (синусоидальном и несинусоидальном), так и на постоянном и пульсирующем напряжениях [В.6, В.8, 6.3].

В связи с этим целесообразно рассматривать работоспособность конденсаторов в следующих условиях: когда ЧР не возникают или их интенсивность исключительно мала (область I) и при возможном возникновении начальных (область II) и критических (область III) ЧР (рис. 6.2.2, *а*).

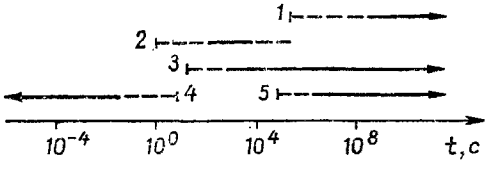


Рис. 6.2.1. Области распределения во времени основных форм пробоя конденсаторов с твердым диэлектриком: *1* — под действием начальных ЧР; *2* — под действием критических ЧР; *3* — тепловой пробой; *4* — чисто электрический пробой; *5* — электрохимический пробой

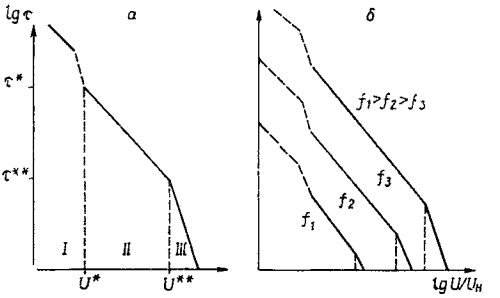


Рис. 6.2.2. Характерные области кривых жизни конденсаторов: I—область, где ЧР отсутствуют; II—область, где ЧР имеют интенсивность начальных; III—область, где ЧР имеют интенсивность критических при одной частоте (*а*) и при частотах $f_1 > f_2 > f_3$ (*б*)

Таблица 6.2.2

Виды конденсаторов	Значение показателя степени a в формуле (6. 2.2)		Значение n ; примечания
	$U^* < U < U^{**}$	$U > U^{**}$ при $f \leq 50$ Гц	
Бумажные:			
пропитанные вазелином	7,5	—	$n \approx 0{,}8$ (пропитка нефтяным маслом) $n \approx 0{,}62$ (пропитка трихлордифенилом)
нефтяным маслом	3—12	10—36	В зависимости от толщины диэлектрика d $a = 12 - 0{,}086\,d$
трихлордифенилом	5—8	—	В зависимости от температуры и значения U
Бумажно-полипропиленовые, пропитанные трихлордифенилом	7,6—9,8	—	Для различной толщины диэлектрика и объемной доли пленки
Бумажно-лавсановые, пропитанные вазелиновым маслом	6,5	—	—
Полипропиленовые, пропитанные трихлордифенилом	9,3	—	—
Лавсановые, непропитанные	2,8—3,8	12	—
Лавсановые, пропитанные октолом	5—10	—	—
Полистироловые, непропитанные	—	10	—
Полистироловые, пропитанные нефтяным маслом	6,9	—	—
Фторопластовые, непропитанные	4,2	7,0	—

На переменном синусоидальном напряжении основными режимными факторами, влияющими на работоспособность конденсаторов, являются значение и частота напряжения (рис. 6.2.2, *б*).

В I области, где рабочее напряжение ниже напряжения возникновения начальных ЧР ($U < U^*$), имеет место в основном тепловое старение конденсаторов. При $U^* \leqslant U < U^{**}$ старение конденсаторов происходит под действием ЧР, имеющих интенсивность начальных (см. § 2.4). В III области при $U^* \geqslant U^{**}$ ЧР приобретают характер критических, и пробои конденсаторов происходят практически без изменения их основных параметров в течение небольшого промежутка времени (рис. 6.2.1).

В I и во II областях отказы конденсаторов обычно возникают в результате теплового пробоя, а в III — из-за термоионизационного разрушения диэлектрика или чисто электрического пробоя.

В I области результаты ресурсных испытаний конденсаторов часто аппроксимируют выражением вида

$$\tau = A_1 e^{\frac{W}{kT}}, \qquad (6.2.1)$$

где W — энергия активации диэлектрика; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура внутри конденсатора (К); A_1 — коэффициент, зависящий от вида диэлектрика.

Во II области (рис. 6.2.2, *а*) для большинства конденсаторов с органическим диэлектриком зависимость ресурса от напряжения и частоты при неизменной внутренней температуре имеет вид

$$\tau = A_2 U^{-a} f^{-n}, \qquad (6.2.2)$$

где A_2, a и n — постоянные в определенном диапазоне изменения параметров режима работы коэффициенты (табл. 6.2.2).

В этой области приближенно соблюдается соотношение $A_2 \tau f^n = \text{const}$ [В.7, В.8, 6.4], что позволяет пересчитывать ресурсы конденсаторов по результатам ускоренных испытаний [6.5, 6.6], а также определять предельно допустимые значения величин U_2 и f_2 при условии обеспечения заданного ресурса τ_2, если известен ресурс τ_1 при U_1 и f_1:

$$\lg \tau_1/\tau_2 = a \lg \frac{U_2}{U_1} + n \lg f_2/f_1. \qquad (6.2.3)$$

Влияние температуры внутри конденсаторов на их ресурс во II области (рис. 6.2.2, *а*) является более сильным, чем в I области, из-за возникновения под действием ЧР химически активных продуктов разложения (см. § 2.4, [В.7]).

Для бумажных и бумажно-пленочных конденсаторов, пропитанных хлордифенилами, с целью прогнозирования ресурса часто применяется соотношение (4.6.21). При этом показатель степени a для бумажного диэлектрика составляет 7,7, для бумажно-полипропиленового диэлектрика — 9,4 [6.7]. Одновременно температура оказывает существенное влияние на напряженность критических ЧР (см. § 2.4) и интенсивность начальных ЧР.

Установлено, в частности, что значительный рост tgδ, приводящий к тепловому пробою конденсаторов, при длительном воздействии переменного напряжения частотой 50 Гц имеет место, если рабочая напряженность превышает 0,5 $E_{кр.ЧР}$ для бумажно-хлордифенилового диэлектрика и 0,3 — для бумажно-масляного [6.8, 6.9].

Необходимо отметить, что вышеупомянутые формулы жизни конденсаторов определяют, как правило, среднее значение ресурса конденсатора. Кроме этого, их действие ограничено сравнительно узким диапазоном значений режимных факторов, различным для конкретных видов конденсаторов.

Нарушение принципа аддитивности (независимости действия факторов) приводит к более сложным зависимостям ресурсов конденсаторов от условий эксплуатации [6.10—6.13].

В III области (рис. 6.2.2, *а*) при $U \geqslant U^{**}$ соотношение $A_2\tau f^n \neq \text{const}$ (например, для непропитанных конденсаторов произведение $A_2\tau f^n$ уменьшается с ростом частоты [В.8]). В этой области усиливается зависимость ресурса конденсаторов от напряжения (рис. 6.2.2, *а*).

Последнее отражается увеличенными значениями показателя a, взятого согласно данным табл. 6.2.2 при $U \geqslant U^{**}$.

В качестве U^{**} обычно принимается напряжение критических ЧР. Это значение существенно зависит от конструкции конденсаторов, а также частоты напряжения (см. рис. 6.2.2, *б*) и внутренней температуры (см. § 2.4, 4.6, [В.6, В.7]).

Конструкции и рабочие напряжения секций конденсаторов обычно такие, что они работают в I области или в левой части II области (рис 6.2.2, *а*) и только при перегрузках — в правой части II области или даже в III области.

К числу основных конструктивных факторов, от которых зависят показатели долговечности конденсаторов на переменном напряжении, относятся: вид твердого и пропитывающего диэлектрика, его суммарная толщина [В.1, В.2, В.6, В.7, В.29, 2.11, 6.14—6.18]. Кривые жизни конденсаторов с различными типами диэлектриков показаны на рис. 6.2.3 [В.29]. Значения кривых: *1* — пропитанная трихлордифенилом (ТХД) конденсаторная бумага объемной массой 800 кг/м³; *2* — пропитанная нефтяным маслом полистирольная пленка; *3*, *4* — пропитанная ТХД комбинированная изоляция: полипропиленовая пленка 67%, конденсаторная бумага объемной массой 1000 кг/м³ — 33% (*3*); с эпоксидным стабилизатором 0,1% по массе и ТХД (*4*); *5* — пропитанная ТХД полипропиленовая пленка.

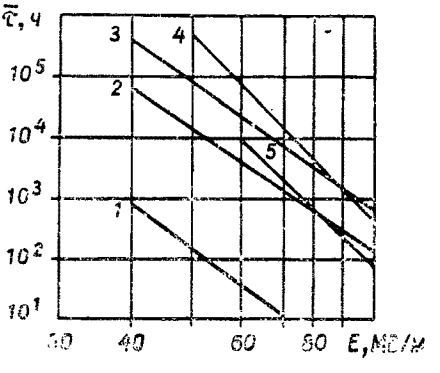


Рис. 6.2.3. Зависимость среднего ресурса конденсаторов от напряженности электрического поля. Толщина диэлектрика 30 (*1*—*4*) и 100 мкм (*5*), коэффициент запрессовки κ=0,9

При пульсирующем напряжении старение конденсаторов с органическим диэлектриком может происходить одновременно под действием электрохимических процессов и ЧР. Изменение их ресурса при изменении режима работы обычно определяют с помощью выражения

$$\tau = A_3 U^{-a} e^{W/kT}, \qquad (6.2.4)$$

где коэффициенты A_3 и a зависят от вида диэлектрика.

При прогнозировании ресурса танталовых оксидно-полупроводниковых конденсаторов используют также соотношение следующего вида: $\tau = \tau_0 e^{\frac{W-\alpha U}{kT}}$, в котором параметры τ_0, W, α определяются из эксперимента; k — постоянная Больцмана; T — температура (К) [6.19].

Для керамических конденсаторов процесс старения носит сложный характер, состоящий из нескольких участков с различными механизмами деградации диэлектрика [В.11, В.17].

Пересчет ресурсов на основании данных ускоренных испытаний при форсировании за счет температуры производят также с помощью следующих соотношений [В.1]:

$$\tau_1 = \tau_2 \cdot 2^{\frac{T_2-T_1}{b}}; \qquad (6.2.5)$$

$$\tau_1 = \tau_2 m^{\frac{T_2-T_1}{10}}, \qquad (6.2.6)$$

где b и m — коэффициенты, зависящие от конструкции конденсатора (табл. 6.2.3).

Из выражения (6.2.5) при b=10 следует известное «правило десяти градусов», согласно которому ресурс бумажных конденсаторов изменяется в два раза при изменении температуры на 10 К, а при b= =8 — на 8 К («правило восьми градусов»).

Для I области (рис. 6.2.2, *а*), т. е. при отсутствии ЧР от постоянной составляющей, характерны меньшие значения коэффициента m (табл. 6.2.3), тогда как для II — бо́льшие.

В связи с тем, что от абсолютных и относительных значений постоянной и переменной составляющей напряженности электрического поля существенно зависят параметры ЧР (рис. 6.2.4, [6.20], см. также § 2.4, [В.6, В.7]), работоспособность конденсаторов определяется данными составляющими. Возможны два случая: когда амплитуда напряженности переменной сос-

Таблица 6.2.3

Вид конденсатора	Значения коэффициентов: a в формуле (6.2.4)	m при $b = 10$ в формуле (6.2.6)	b при $m = 2$ в формуле (6.2.5)	Примечания
Бумажный	5	2	10	Среднее значение
»	4—6	2,0—2,5	10—13	Обычный разброс ($U < U^*$)
»	8—14	—	—	Обычный разброс ($U \geqslant U^*$)
»	3,7—20,0	1,3—6,0	8,7—26,0	Крайние пределы разброса
Лавсановый	4,0—6,5	2—4	5—10	$(1—2)U_н$; 75°C
Слюдяной	8	2	10	$(1—2)U_н$; 125°C
Керамический низкочастотный	3,0—4,5	2	10	$(1,5—2,0)U_н$; 150°C
Оксидно-электролитический танталовый фольговый	5	1,4—2,3	5—12	$(0,8—1,0)U_н$; 85°C

тавляющей сравнительно мала (обычно менее 20—30% от E_0; конденсаторы при этом старятся под действием ЧР, возникающих в основном из-за постоянного напряжения) и когда амплитуда переменной составляющей достаточна для возникновения ЧР на полупериодах этой составляющей (конденсаторы в данном случае при одинаковой интенсивности ЧР старятся быстрее, чем при переменном напряжении, не содержащем постоянной составляющей). Поэтому для обеспечения необходимых показателей долговечности конденсаторов в последнем случае предельно допустимые рабочие напряженности электрического поля принимаются пониженными как для постоянной, так и для переменной составляющей по сравнению с предыдущим случаем и работой на синусоидальном напряжении (см. § 4.6).

При напряжении, содержащем постоянную составляющую, работоспособность конденсаторов сильно зависит от вида пропитывающего диэлектрика. Наименее стойкими в этом случае являются хлордифенилы, однако добавка стабилизирующих компонентов обеспечивает их удовлетворительную работоспособность [В.1, 2.11, 6.9, 6.17].

Кроме отмеченных особенностей, необходимо также принимать во внимание влияние на работоспособность конденсаторов тепловыделения и их нагрева под действием постоянной и особенно переменной составляющей напряжения (см. § 5.3, 6.1).

При импульсном режиме работы работоспособность конденсаторов определяется теми же факторами, которые уже рассматривались, а также действием тепловых нагрузок (см. § 6.1).

При апериодическом разряде конденсаторов (см. § 5.1) влияние параметров составляющих напряжения на работоспособность конденсаторов в определённой мере аналогично случаю для пульсирующего напряжения. Важными особенностями здесь являются: большая пульсация напряжения и локализация во времени ЧР в диэлектрике на интервалах с высокими скоростями изменения мгновенного напряжения $\left(\frac{du}{dt}\right)$.

Если исходить из принятой для ЧР модели (см. § 2.4, [В.4, В.6, В.7]), то при условии отсутствия ЧР на вершинах трапецеидального напряжения (рис. 5.1.2, *а*) изменение ресурса конденсаторов при непрерывных простых режимах электрического нагружения приближенно выражается соотношением [В.12]:

$$\tau = \tau_1 \left(\frac{U_{m1}}{U_m}\right)^a \frac{f_1}{f_п} \left(1/2t_ф\right)^{1-n}, \quad (6.2.7)$$

где τ_1 — ресурс конденсаторов при синусоидальном напряжении, имеющем амплитуду U_{m1} и частоту f_1.

Соотношение (6.2.7) применимо для случаев, когда работа конденсаторов происходит во II области (рис. 6.2.2, *а*). С уменьшением длительности фронта $t_ф$ даже при неизменном числе единичных ЧР растет их интенсивность в результате увеличения частоты следования ЧР на фронтах, однако при этом среднее на периоде повторения значение мощности ЧР может сохраняться постоянным.

При некотором критическом значении $t_ф$, зависящем от напряжения зарядки и конструкции конденсаторов, число ЧР на фронтах напряжения резко возрастает в результате значительного нагрева мест возникновения ЧР.

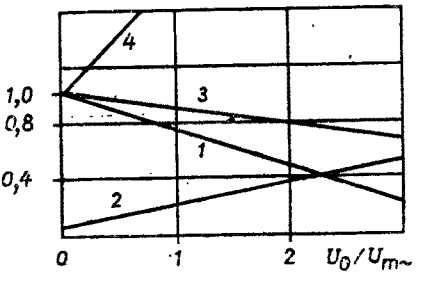


Рис. 6.2.4. Зависимость относительных значений интенсивности ЧР (*1*), напряжения их погасания (*2*), напряжения критических ЧР переменной составляющей (*3*) и критических ЧР для полного напряжения (*4*) от относительного значения напряжения постоянной составляющей при переменной составляющей синусоидальной формы частотой 50 Гц

Это обуславливает изменение механизма разрушения диэлектрика (возникает термоионизационная деструкция) и резкое снижение ресурса конденсаторов в импульсном режиме работы после достижения длительности разряда критического значения [6.21, 6.22].

Рассмотренные выше особенности поведения конденсаторов при пульсирующем напряжении учитываются в случае выбора диэлектрика и рабочих напряженностей электрического поля в нем для конденсаторов с апериодическим характером разряда [В.4, В.7, 6.23].

При повышенных температурах внутри конденсатора ЧР, инициированные на фронтах, могут продолжать существовать на участках, где $\frac{du}{dt}=0$, т. е. на вершинах при постоянном напряжении. В связи с этим суммарная мощность ЧР возрастает, а ресурс конденсаторов сильно изменяется при варьировании U_m (в соотношении (6.2.7) увеличивается значение показателя степени a).

В случае импульсного колебательного разряда основное влияние на ресурс конденсаторов оказывают значение зарядного напряжения, декремент и частота колебаний при разряде [В.4, В.6, В.7, 6.24—6.32].

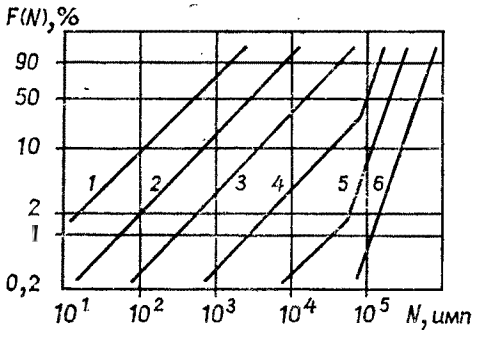


Рис. 6.2.5. Интегральные функции распределения ресурсов импульсных конденсаторов с бумажно-лавсановой изоляцией (d=80 мкм) и различной максимальной напряженностью электрического поля при зарядке; МВ/м: *1*—110; *2*—100; *3*—90; *4*—80; *5*—70; *6*—60 [6.25]

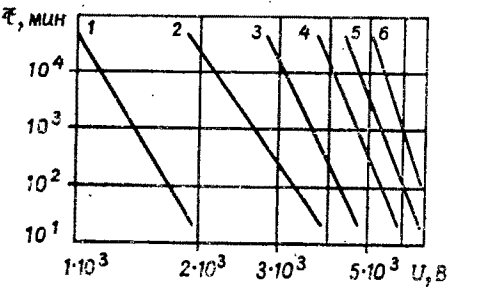


Рис. 6.2.6. Зависимость среднего ресурса металлизированных бумажно-лавсановых конденсаторов емкостью 10,0 мкФ в импульсном режиме работы с апериодическим характером разряда при $f_п$ =0,25 Гц. Кривые *1—6* соответствуют диэлектрикам с суммарной толщиной 12, 17, 20, 28, 34, 34 мкм, состоящим из слоев металлизированной бумаги (МБ) и пленки (П): МБ6+П6; МБ6+П6+Б5; МБ6+П8+Б6; МБ10+П10+Б8; МБ6+2П6+2Б8; МБ10+2П6+2Б6

В большинстве практических случаев импульсные конденсаторы работают во II области и реже — в I и III (рис. 6.2.2,*а*).

Зависимость ресурса импульсных конденсаторов (здесь — среднего числа импульсов до отказа) от параметров напряжения можно представить в следующем виде [6.29—6.31]:

$$N = N_и E^{-a_и} f_р^{-n_1} \Delta^{n_2}, \qquad (6.2.8)$$

где значения коэффициентов $N_и$, $a_и$, n_1 и n_2 зависят от конструкции конденсаторов.

Наибольшую наработку при прочих равных условиях в импульсных режимах имеют бумажно-пленочные и чисто пленочные конденсаторы с жидкими пропитками [В.2, 6.24, 4.20].

Результаты ресурсных испытаний импульсных конденсаторов показывают, что в распределениях их ресурсов имеется два характерных участка (рис. 6.2.5) [6.25].

Первый участок, соответствующий меньшим вероятностям отказа, обусловлен пробоями диэлектрика в области квазиоднородного электрического поля и не связан со старением изоляции.

Второй — вызван в основном пробоями в результате старения диэлектрика под действием ЧР у краев обкладок. Значение коэффициента $a_и$ в выражении (6.2.8) для бумажно-касторовых конденсаторов по данным работы [6.25] составляет порядка 16 (пробои в области квазиоднородного поля) и порядка 6 — пробои в результате старения (см. рис. 6.2.5).

Данные, приведенные в [6.33], для многослойных бумажно-лавсановых конденсаторов с металлизированными обкладками показывают более сильную зависимость ресурса от U. Значение коэффициента $a_и$ в соотношении (6.2.8) для этих конденсаторов находится в пределах 11—20, возрастая с увеличением толщины диэлектрика, в отличие от конденсаторов с фольговыми обкладками, у которых значение показателя $a_и$ уменьшается с ростом толщины диэлектрика как на переменном синусоидальном, так и на импульсном напряжении [В.2, В.6, В.7]. Особенностью таких металлизированных импульсных конденсаторов является старение под действием самовосстанавливающих пробоев (отказы при этом носят в основном параметрический характер). Поэтому ресурс таких конденсаторов увеличивается при одновременном росте толщины диэлектрика и рабочей напряженности электрического поля (рис. 6.2.6) в связи с уменьшением вероятности пробоя и числа актов самовосстановления при больших толщинах диэлектрика.

Вместе с тем из-за увеличения энергии, выделяющейся в зоне самовосстановления при более высоких рабочих напряжениях [В.18], у таких конденсаторов с ростом толщины диэлектрика усиливается зависимость показателей долговечности (ресурса) от напряжения (рис. 6.2.6).

Одним из путей, позволяющим анализировать влияние эксплуатационных режимов на показатели долговечности конденсаторов как при синусоидальном, так и при импульсном напряжении, является построение моделей в виде уравнений регрессии разного порядка и получение их коэффициентов на основе планирования многофакторного активного эксперимента [6.10, 6.34].

Работоспособность конденсаторов зависит не только от характера и параметров длительно воздействующего напряжения, но и от параметров кратковременных перенапряжений (в том числе их продолжительности, частоты и кратности).

Результаты испытаний различных конструкций конденсаторов [6.14, 6.35 и др.] выявили существенную зависимость работоспособности конденсаторов при наличии перенапряжений от вида твердого и пропитывающего диэлектрика, числа и толщины отдельных слоев. При редких перенапряжениях большой кратности необходимо принимать во внимание не столько эффекты старения, сколько кратковременную электрическую прочность изоляции (см. § 4.6).

Особенно это относится к одно- и двухслойным конденсаторам, имеющим большие разбросы пробивных напряжений [В.2, 6.15, 6.16, 6.35, 6.36].

Уровень допустимых перегрузок по напряжению для некоторых типов конденсаторов нормируется [В.6].

В качестве предельно допустимой амплитуды напряжения в [В.11] рекомендуется принимать амплитуду испытательного напряжения.

Исключительно малым запасом кратковременной электрической прочности обладают оксидно-электролитические конденсаторы, для которых обычно предельно допустимая амплитуда напряжения $U_{mд} \leqslant (1{,}1—1{,}2)\ U_н$.

Некоторые виды конденсаторов для электронных и радиотехнических устройств теряют работоспособность не только при очень высоком, но и при слишком низком рабочем напряжении. К ним относятся: конденсаторы с органическим диэлектриком, с фольговыми обкладками и вкладными токоподводами (отказ типа потери емкости из-за образования изоляционной оксидной пленки), однослойные металлизированные конденсаторы (параметрические отказы в результате снижения $R_{из}$ и невозможности самовосстановления при низком напряжении, а также некоторые виды оксидно-электролитических конденсаторов, у которых при низком напряжении может сильно снизиться емкость. Такие типы бумажных конденсаторов, как БМ-1, БМТ-1, К40-2, КБГИ, КБГ-МП, КБГ-МН и их модификации, а также пленочные типа ПКГТ, ПМ-1, ПСО, ПМГП и бумажно-пленочные К75-12 в плоских корпусах, не рекомендуется применять при напряжениях ниже 10 В согласно ОСТ 11.074.011-79.

Суммируя вышеизложенное, можно констатировать, что для обеспечения работоспособности конденсаторов необходимо, чтобы полный размах $U_{п.п}$, амплитуда U_m и постоянная составляющая U_0 рабочего напряжения не превосходили определенных значений, зависящих от конструкции конденсаторов, режима их работы и требуемых показателей надежности в эксплуатации:

$$U_{п.п} \leqslant U_{п.п.д}; \qquad (6.2.9)$$

$$U_m \leqslant U_{mд}; \qquad (6.2.10)$$

$$U_0 \leqslant U_{0д}; \qquad (6.2.11)$$

$$U_р \geqslant U_{min}. \qquad (6.2.12)$$

Предельно допустимые значения напряжений в этих соотношениях определяются исходя из экспериментальных данных при проведении испытаний конденсаторов на надежность, в том числе при ресурсных испытаниях с форсированием режима работы.

На основании таких данных в нормативно-технической документации предельно допустимые значения напряжения указываются в зависимости от частоты, температуры и других параметров режима работы и условий эксплуатации, а для некоторых видов конденсаторов их связывают также с показателями долговечности.

Учитывая большое разнообразие условий эксплуатации конденсаторов, для практики важно определять значения величин $U_{п.п.д}$, $U_{mд}$ и $U_{0д}$ расчетным путем (см. седьмую главу) с использованием формул жизни конденсаторов, опыта их эксплуатации и исследований. Расчетные значения при необходимости могут быть уточнены экспериментально. Методика расчета предельно допустимых параметров рабочего напряжения (см. седьмую главу) базируется на том, что для каждого типа конденсаторов будут обеспечены определенные показатели долговечности, если рабочее напряжение находить с учетом зависимости работоспособности конденсаторов от характера, параметров рабочего напряжения, а также от температуры и других факторов.

Для этого значения величин $U_{п.п.д}$, $U_{mд}$ и $U_{0д}$ должны определяться с учетом тепловых нагрузок (см. § 6.1), а также действия частичных разрядов и электрохимических процессов с целью обеспечения длительной и кратковременной электрической прочности конденсаторов.

На практике возникает также задача определения, допустимо ли применение конденсаторов в условиях, отличных от номинальных (при других режимах работы, температурах, требуемых показателях долговечности и т. д.).

Указанные задачи решаются с разной степенью достоверности для различных видов конденсаторов в зависимости от предынформации. Наиболее обоснованным является подход, учитывающий конструктивные особенности конденсаторов, их температурно-частотные и временные характеристики, в том числе модели старения,

Таблица 6.2.4

Величина	Конденсаторы, рассчитанные на работу при низких и средних частотах, с номинальным напряжением			Накопительные конденсаторы, рассчитанные на работу с полным разрядом при инфранизких частотах, при их использовании на низких и средних частотах с номинальным ресурсом****)	
	постоянным	переменным синусоидальной формы	переменным типовой формы (рис. 5.1.2)	малым $N_н \leqslant 10^4_н$	большим $N_н > 10^4_н$
Предельно допустимая амплитуда напряжения $U_{тд}$	$U_{тд} = U_н$	$U_{тд} = \sqrt{2}U_н$	$U_{тд} = U_н^{**)}$ $U_{тд} = (1{,}2—1{,}5)U_н^{***)}$	$U_{тд}^{**)} = (0{,}25—0{,}4)\,U_н^{**)}$	$U_{тд}^{**)} = (0{,}4—0{,}7)\,U_н^{**)}$
Предельно допустимый полный размах напряжения $U_{п.п.д}$	$U_{п.п.д} = 2U_н$ при $U_н < 400$ В $U_{п.п.д}^{*)} = (600—700)$В при $U_н \geqslant 400$ В	$U_{п.п.д} = 2\sqrt{2}\,U_н$	$U_{п.п.д} = U_н^{**)}$ $U_{п.п.д} = 2\,U_н^{***)}$ $U_{п.п.д}^{*)} = (600—700)$В при $U_н \geqslant 400$В	$U_{п.п.д}^{**)} = (0{,}25—0{,}4)\,U_н^{**)}$ $U_{п.п.д}^{***)} = (0{,}35—0{,}5)\,U_н^{**)}$	$U_{п.п.д}^{**)} = (0{,}4—0{,}7)\,U_н^{**)}$ $U_{п.п.д}^{***)} = (0{,}5—0{,}8)\,U_н^{**)}$
Предельно допустимая постоянная составляющая напряжения $U_{од}$	$U_{од} = U_н$	$U_{од} = (0{,}6—2{,}0)\,U_н$	$U_{од} = (0{,}5—1)\,U_н^{**)}$ $U_{од} = (0{,}8—2)U_н^{***)}$	$U_{од} = (0{,}4—0{,}7)\,U_н^{**)}$	$U_{од} = (0{,}7—0{,}9)U_н^{**)}$

*) Напряжение, приходящееся на секцию конденсатора;
**) однополярное напряжение;
***) двухполярное симметричное напряжение;
****) наибольшие значения предельно допустимых величин относятся к конденсаторам с фольговыми обкладками и (или) максимальными ресурсами, наименьшие — с металлизированными обкладками и (или) минимальными ресурсами.

базирующиеся на физике отказов. Последнее позволяет определять предельно допустимые рабочие напряжения при условии, что будут обеспечены требуемые показатели надежности конденсаторов в эксплуатации.

Однако такой путь не всегда доступен потребителю как из-за отсутствия всех необходимых данных по конструкции, параметрам и характеристикам конденсаторов, так и из-за отсутствия методики оценки интересующих нас величин для большинства видов конденсаторов.

В связи с этим в табл. 6.2.4 приведены приближенные соотношения для определения значений предельно допустимых величин $U_{\text{п.п.д}}$, $U_{mд}$, $U_{\text{од}}$ для конденсаторов с органическим диэлектриком электронных и радиотехнических устройств, при которых обеспечивается работоспособность в течение $\tau_c = 10^3 - 10^4$ ч. В связи с разнообразием конструкций и режимов работы конденсаторов данные табл. 6.2.4 носят ориентировочный характер.

Для конкретных типов конденсаторов предельно допустимые значения $U_{\text{п.п.д}}$, $U_{mд}$, $U_{\text{од}}$ согласно ТУ в зависимости от температуры окружающей среды могут несколько отличаться от значений, получаемых из соотношений табл. 6.2.4.

Так, для конденсаторов К75-10 значения величин $U_{\text{п.п.д}}$ и $U_{mд}$ при $T_{o\,max} \leqslant 70°C$ в 1,2 раза выше, чем значения, получаемые по формулам табл. 6.2.4.

Следует отметить, что для большинства типов конденсаторов в НТД обычно указывают параметры воздействующего напряжения и условия охлаждения, при которых обеспечиваются номинальные показатели долговечности.

§ 6.3. Влияние климатических, механических и ионизирующих факторов на работоспособность конденсаторов

Кроме рассмотренных воздействий, определяющих работоспособность конденсаторов, необходимо учитывать также такие внешние факторы, определяющие их эксплуатационные характеристики, как климатические, механические, ионизирующие воздействия.

Климатические факторы

К климатическим факторам, влияющим на работоспособность конденсаторов при их эксплуатации, относятся: влажность воздуха, температура, давление окружающей среды (воздуха или газа), действие плесневых грибов, солнечная радиация, дождь, ветер, пыль (в том числе снежная), соляной туман, иней, содержание в воздухе коррозионно-активных агентов.

Влажность воздуха является одним из основных климатических факторов, определяющих работоспособность конденсаторов.

Таблица 6.3.1

T, °C	$P_{\text{н.п}}$, Па	T, °C	$P_{\text{н.п}}$, Па
Над льдом, 0 ÷ —40°C		*Над водой, 0 ÷ +50°C*	
0	610	0	610
—1	563	1	656
—3	476	3	760
—5	401	4	812
—10	263	5	871
—15	165	10	1227
—20	103	15	1700
—25	62,5	20	2340
—30	37,3	25	3160
—35	14,7	30	4250
—40	12,4	35	5620
		40	7370
		45	9560
		50	12300

Влажное состояние воздуха характеризуется абсолютной и относительной влажностью, а также влагосодержанием.

Абсолютная влажность характеризуется массой водяных паров $m_{\text{п}}$, содержащихся в 1 м³ воздуха(г/м³). Чем больше $m_{\text{п}}$, тем выше и парциальное давление $P_{\text{п}}$ водяных паров при той же температуре и том же барометрическом давлении воздуха. Следовательно, величина $P_{\text{п}}$ также является характеристикой влажности воздуха. При фиксированных температуре T и барометрическом давлении P $P_{\text{п}}$ не может увеличиваться беспредельно и имеет предельное значение давления насыщенного пара $P_{\text{н.п}}$; максимальному значению $P_{\text{п}} = P_{\text{н.п}}$ соответствует и максимальное значение абсолютной влажности $m_{\text{н.п}}$. Чем выше температура воздуха $T(°C)$, тем больше значения $P_{\text{н.п}}$ и $m_{\text{н.п}}$. Связь между $m_{\text{н.п}}$ и $P_{\text{н.п}}$ определяется соотношением

$$m_{\text{н.п}} = \frac{1{,}06 \cdot P_{\text{н.п}}}{1 + 0{,}00366 \cdot T} \text{ г/м}^3.$$

В табл. 6.3.1 приведены значения упругости насыщенного водяного пара (в Па) для различных значений температур при барометрическом давлении 1006 гПа. Упругость водяного пара $P_{\text{п}}$ в воздухе или его абсолютная влажность $m_{\text{п}}$ не дают представления о степени насыщения влагой воздуха, если при этом не указана его температура.

Относительная влажность выражается в процентах и равна отношению действительной массы $m_{\text{п}}$ пара в объеме к максимально возможной массе $m_{\text{н.п}}$ пара при данной температуре:

$$\varphi = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{н.п}}} \cdot 100\%. \qquad (6.3.1)$$

С повышением температуры относительная влажность снижается, с понижением — по-

вышается. При некоторой температуре, когда $P_{\text{п}} = P_{\text{н.п}}$, воздух получает относительную влажность $\varphi = 100\%$, т. е. достигает полного насыщения водяным паром. Эта температура носит название температуры *точки росы* для данной абсолютной влажности.

Известны случаи, когда аппаратура, нормально функционирующая при наладке, настройке и стендовых испытаниях в лабораторных условиях, оказывалась практически неработоспособной при эксплуатации в среде с повышенной влажностью ввиду отказов конденсаторов. Поэтому в технических условиях и стандартах на конденсаторы указывается максимально допустимое значение относительной влажности при конкретной температуре. На рис. 6.3.1 приведена зависимость относительной влажности φ от температуры при различных значениях абсолютной влажности (область нормальных условий заштрихована).

Повышенная влажность окружающей среды, в которой эксплуатируется конденсатор, вызывает коррозию металлических частей, способствует развитию микроорганизмов, грибков, плесени, повышает ток утечки, снижает $R_{\text{из}}$ и электрическую прочность. При наличии химически активной среды разрушительное действие влаги увеличивается.

В этой связи важное значение приобретает влагозащита конденсаторов (уплотнение и герметизация конструкции, покрытие лаком, эмалью, компаундом, опрессовка пластмассой). Наиболее влагостойкими являются такие типы, как К75-10, К72П-6, К73П-2, К40У-5, К40У-9 и др. Низкую влагостойкость имеют негерметизированные бумажные, металлобумажные и слюдяные конденсаторы. Одной из эффективных мер обеспечения влагозащиты конденсаторов является герметизация аппаратуры или ее блоков, в которой они работают.

В настоящее время, к сожалению, отсутствуют данные о допустимых электрических нагрузках на конденсаторы при их эксплуатации во влажной среде.

Если температура корпуса конденсатора ниже нуля, то избыток влаги в воздухе выпадает на его поверхность в виде инея, а затем с повышением температуры происходит оттаивание инея с образованием росы на поверхности.

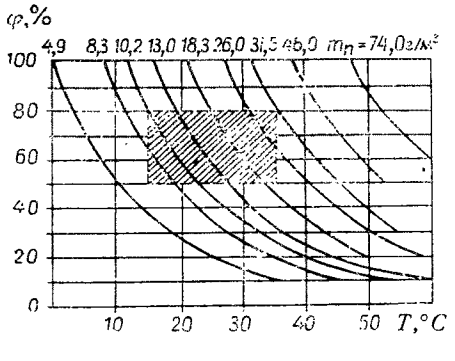


Рис. 6.3.1. Зависимость относительной влажности воздуха от температуры при различных значениях абсолютной влажности

Выпадение инея с последующим его оттаиванием практически не оказывает существенного влияния на работоспособность конденсаторов при номинальном напряжении <1600 В. Однако влага, образовавшаяся на поверхности конденсатора, увеличивает поверхностную проводимость и вызывает снижение электрической прочности и сопротивления изоляции до единиц мегаом и ниже. К высоковольтным конденсаторам требования по устойчивости к воздействию инея с последующим его оттаиванием не предъявляются.

Технические условия и стандарты на конденсаторы устанавливают допустимые интервалы рабочих температур, приведенные в справочных данных по конденсаторам. В последнее время конденсаторы стали применяться и при значительно более низких температурах. Основным фактором, ограничивающим применение конденсаторов при низких температурах, является изменение емкости. При этом наименьший уход емкости наблюдается у полистирольных, фторопластовых и слюдяных конденсаторов. При температуре —180°С имеет место увеличение емкости до 2% от значения при +20°С для полистирольных и фторопластовых и изменение емкости не более ±1% для слюдяных (КСО, СГМ) конденсаторов. При температуре —180°С могут применяться бумажные (КБГ, К40У-9), металлобумажные (МБГО, К42-4, К42У-2), танталовые и ниобиевые оксидно-полупроводниковые конденсаторы, уменьшение емкости которых при указанной температуре составляет около 30%, а также комбинированные (ПЭТФ + бумага) и лакопленочные конденсаторы, емкость которых при этой же температуре уменьшается на 20%.

В ряде случаев на работоспособность конденсаторов оказывает влияние давление окружающей среды. Повышенное до 3 атм ($3 \cdot 10^5$ Па) давление воздуха не оказывает вредного влияния на работу конденсатора. При пониженном давлении уменьшение электрической прочности воздуха создает опасность пробоя воздушных промежутков и перекрытия по поверхности конденсаторов.

При сверхнизком остаточном давлении и в вакууме (например, в космических условиях) резко возрастает электрическая прочность среды, однако может происходить испарение жидких и консистентных, а также сублимация твердых материалов. В таком случае практически отсутствует конвективный теплообмен, т. е. увеличивается наружное тепловое сопротивление. Поэтому с учетом данных обстоятельств в ТУ на конденсаторы приводятся допустимые электрические нагрузки в зависимости от давления окружающего воздуха.

В условиях тропического и субтропического климата из-за высокой влажности в атмосфере увеличивается количество спор плесневых грибов. Плесень, растущая на поверхности конденсаторов, выделяет гидролизующие окислительно-восстановитель-

ные ферменты и разрушает защитное покрытие. Колонии плесени растут как на поверхности защитного покрытия конденсатора, так и внутри покрытия и под ним. Плесневые грибы приводят к ухудшению адгезионной способности защитного покрытия и существенно изменяют изоляционные свойства органических материалов.

Защитные покрытия конденсаторов, предназначенных для эксплуатации в тропическом климате, выполняются из материалов, устойчивых к росту плесневых грибов.

Допустимые механические нагрузки

При работе в аппаратуре различного назначения конденсаторы подвергаются механическим воздействиям. Механические нагрузки подразделяются на три вида: вибрацию, удары и линейные (центробежные) нагрузки.

Вибрационные нагрузки имеют случайный характер и проявляются в широкой полосе частот. При оценке устойчивости конденсаторов к вибрациям различают их вибропрочность и виброустойчивость. Под *вибропрочностью* понимают свойство конденсаторов противостоять вибрации и после ее длительного воздействия сохранять свою работоспособность. Под *виброустойчивостью* понимают способность конденсаторов выполнять свои функции во время действия вибрации.

Вибрация вызывает в деталях конденсатора усталостные явления, способствующие нарушению его механической прочности и выходу из строя. Наиболее частым последствием воздействия вибрации является полная или частичная потеря емкости из-за обрыва выводов, теплопроводящих элементов внутри самого конденсатора, нарушения целостности контактного узла (для бумажных, металлобумажных и пленочных), обрыва анода у электролитических объемно-пористых и оксидно-полупроводниковых конденсаторов, отслоения электродов у керамических конденсаторов. Вибрация приводит к нарушению герметичности конструкции силовых конденсаторов, прежде всего в местах крепления проходных изоляторов.

Нагрузка на конденсатор при вибрации достигает максимального значения в случае совпадения частоты вибрации с собственной механической резонансной частотой конденсатора. В этой связи при креплении конденсаторов в аппаратуре пайкой за выводы целесообразно ограничивать верхнее значение возможных вибрационных частот половиной собственной резонансной частоты конденсатора. Собственная частота конденсатора определяется экспериментальным путем. Её значение зависит от длины выводов при креплении (чем больше расстояние от места пайки до корпуса конденсатора, тем ниже его собственная частота), диаметра выводов и массы конденсатора. Обычно конденсаторы с проволочными выводами крепятся, как показано на рис. 6.3.2 [В.11]. В случае превышения допустимых механических усилий при креплении за выводы рекомендуется конденсаторы крепить за корпус, заливать или приклеивать их к плате.

При монтаже конденсаторов разрешается пайка выводов на расстоянии не менее 5 мм от корпуса. ТУ на конденсаторы регламентируют минимальное расстояние от корпуса конденсатора, на котором производится изгиб вывода. Места изгиба или пайка на обоих выводах должны располагаться симметрично относительно сере-

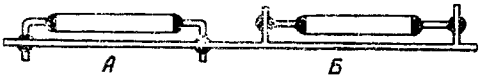


Рис. 6.3.2. Способы крепления конденсаторов: закрепляемый конец вывода расположен перпендикулярно (*А*) и параллельно (*Б*) плоскости конденсатора

дины корпуса; радиус изгиба выводов должен быть не меньше их удвоенной толщины.

Удары возникают при внезапном приложении к конденсатору внешних сил либо в результате резкого изменения его скорости за очень короткий промежуток времени. Различают одиночные и многократные удары. Одиночные удары характеризуются короткой длительностью (0,2—5,0 мкс) и большим ускорением (1470—9800 м/с^2 и более). Длительность многократных ударов больше 1—10 мкс.

При ударах в конденсаторе могут возбуждаться затухающие неустановившиеся колебания. Близкие совпадения частоты этих колебаний с собственной частотой механического резонанса конденсатора приводят к таким же последствиям, как и при вибрации. Возможность применения конденсаторов при ударных нагрузках определяется обычно экспериментально, а допустимое ускорение и число ударов указываются в ТУ.

Линейные нагрузки имеют однонаправленный характер. Центробежное ускорение определяется из соотношения

$$G = 4\pi^2 l n^2, \qquad (6.3.2)$$

где G — ускорение, м/с^2; l — длина плеча от центра вращения до геометрического центра конденсатора, м; n — число оборотов в секунду. Линейные нагрузки не вызывают собственных колебаний и при этом, как правило, не происходит отказов конденсаторов. Исключение могут составить лишь крупногабаритные конденсаторы. В этом случае необходимы дополнительные испытания.

Сведения о допустимых при эксплуатации конденсаторов величинах механических нагрузок приводятся в ТУ.

Влияние ионизирующих излучений

При применении конденсаторов в устройствах атомной энергетики, в электрофизической аппаратуре ускорителей, космической электронике возникают требования, связанные с их радиационной стойкостью к воздействию различного рода излучений.

Таблица 6.3.2

Тип диэлектрика	Разрушающая доза облучения, Дж/кг
Полистирольный	$5 \cdot 10^6$
Полиэтиленовый	$1 \cdot 10^6$
Полиэтилентерефталатный	$1 \cdot 10^6$
Бумажный	$1 \cdot 10^6$
Танталовый	$1 \cdot 10^4$

В результате действия ионизирующего излучения в конденсаторе образуются заряды различных знаков, возникают радиационные повреждения, приводящие к временным (обратным) или остаточным изменениям его электрических параметров. Основными видами излучений, которым подвергаются конденсаторы при применении в современной аппаратуре, являются: гамма-излучение, потоки нейтронов, протонов, электронов, дейтронов, α-частиц.

Гамма-излучение обладает высокой проникающей способностью. В результате воздействия гамма-лучей на конденсаторы происходит поглощение и рассеяние квантов. Обычно наблюдается три основных вида взаимодействия с веществом гамма-квантов (с энергией до 10 МэВ): фотоэффект, эффект Комптона и эффект образования электронно-позитронных пар [В.11, 6.9]. При фотоэффекте (так называемый внутренний фотоэффект) энергия гамма-кванта расходуется только на изменение энергетического состояния электронов материалов конденсатора. При эффекте Комптона гамма-кванты передают частицам вещества свою энергию не полностью, меняя при этом длину волны. В дальнейшем гамма-кванты (фотоны) при взаимодействии с кулоновским полем ядра теряют свою энергию (1, 11 МэВ), образуя электронно-позитронную пару.

В результате действия гамма-излучения энергия образованных электронов расходуется на ионизацию и возбуждение атомов и молекул, а также на повышение температуры вещества.

Воздействия ионизирующих излучений приводят к снижению $R_{из}$, увеличению токов утечки. При этом изменения емкости и тангенса угла потерь практически не наблюдается. Однако после прекращения данного воздействия изменившиеся параметры достигают исходных значений.

На рис. 6.3.3 показан характер изменения удельной проводимости диэлектриков при импульсном воздействии гамма-излучения прямоугольной формы. Рост проводимости носит экспоненциальный характер:

$$\gamma - \gamma_0 = A\left(1 - e^{-t/\tau_0}\right);$$

$$\tau_0 = K_0 P_\gamma^{-\mu}, \qquad (6.3.3)$$

где γ_0 и γ — начальные и текущие удельные проводимости при воздействии данной мощности излучения; τ_0 — постоянная времени; P_γ — мощность дозы гамма-излучения; A, K_0, μ — эмпирические коэффициенты.

Установившееся значение удельной проводимости диэлектриков равно

$$\gamma - \gamma_0 = B P_\gamma^{\delta}. \qquad (6.3.4)$$

Здесь δ и B — эмпирические коэффициенты, зависящие от вида диэлектрика и условий облучения.

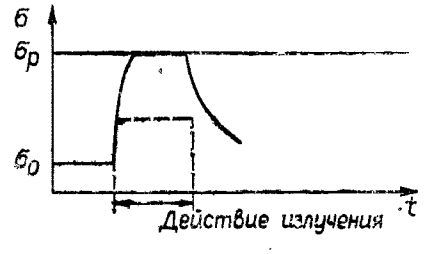


Рис. 6.3.3. Характер изменения во времени удельной проводимости диэлектрика под действием гамма-излучения

При воздействии ионизирующего облучения в конденсаторах с неорганическим диэлектриком (керамическим, стеклянным, слюдяным) могут образовываться дефекты в результате смещения атома со своего положения в кристаллической решетке. Однако в большинстве случаев радиационными изменениями в них можно пренебречь. Изменение характеристик этих конденсаторов обусловлено главным образом влиянием температуры. Снижение емкости таких конденсаторов во время действия облучения носит временный характер.

В конденсаторах с органическими диэлектриками при облучении проявляются химические радиационные эффекты, приводящие к изменению химического строения диалектрика. Наименее устойчивыми к излучению являются бумажные конденсаторы (особенно пропитанные хлорированными жидкостями). Бумажные конденсаторы примерно на два-три порядка более чувствительны к излучению, чем конденсаторы с неорганическим диэлектриком.

Чувствительность конденсаторов с пленочным диэлектриком почти в десять раз превышает чувствительность к излучению конденсаторов с неорганическим диэлектриком. Наиболее стойкими к излучению среди этого класса конденсаторов являются полистирольные.

В табл. 6.3.2 приведены разрушающие дозы облучения для некоторых типов конденсаторов.

Конденсаторы с оксидным диэлектриком, как показали исследования, могут длительное время находиться под воздействием облучения. Танталовые конденсаторы обладают большей радиационной стойкостью, чем алюминиевые. Однако их применение сопряжено с определенными трудностями. Так, под действием потока нейтронов наблюдается активация тантала, радиоактивные продукты которого имеют период полураспада 111 дней, что опасно для обслуживающего персонала. Период полураспада, например Al^{28}, значительно меньше (около 2,3 мин).

В процессе облучения емкость танталовых и алюминиевых электролитических конденсаторов изменяется соответственно в пределах $-10 \div +25\%$ и $-6 \div +65\%$.

Глава 7. Определение предельно допустимых параметров рабочего напряжения и режимов нагружения конденсаторов

Конденсаторы разрабатываются, как правило, для одного конкретного режима работы, для определенных условий охлаждения и показателей надежности. В ТУ также часто приводятся зависимости допустимого переменного напряжения (обычно синусоидальной или трапецендальной формы) от частоты. Однако в связи с разнообразием условий эксплуатации конденсаторов, проявляющемся в большом количестве электрических и тепловых режимов работы, число которых продолжает расти, возникает важная задача — расчет допустимых параметров этих режимов и необходимых условий охлаждения конденсаторов, которые могут отличаться от заданных в ТУ [7.1—7.7].

Решение этой задачи позволит обеспечить оптимальное использование конденсаторов в различных условиях эксплуатации, сократить число типов, потребное для различной электронной аппаратуры и электротехнических устройств.

Зная допустимые рабочие напряжения конденсаторов на разных частотах при различных формах напряжения и условиях охлаждения, можно построить графики и номограммы, позволяющие оценивать допустимость того или иного режима работы для конкретного типономинала конденсатора, определять зависимости удельных характеристик от частоты и других параметров режимов, а также производить выбор конденсаторов, т. е. находить номинальное напряжение и емкость конденсатора, который можно применить в данных условиях.

Таким образом, у разработчиков аппаратуры и конденсаторов существует два принципиально возможных способа определения параметров допустимого рабочего напряжения: по номограммам, графикам и расчетным путем. Последний метод является универсальным, однако требует бо́льших затрат времени, поэтому его применение наиболее целесообразно для решения указанных задач с помощью ЭВМ. Этот путь считается единственно возможным в случае напряжений сложных форм (см. § 5.1).

Определение допустимых параметров напряжения и режимов работы по графикам и номограммам является более удобным, наглядным и быстрым способом. Однако графики могут быть построены только для частных случаев, учитывающих форму напряжения (а также такие его параметры, как длительность фронтов, вершин), характер электрических и тепловых режимов (см. § 5.1), условия охлаждения и т. д. Графики и номограммы следует строить для каждого типономинала конденсаторов, что еще в большей степени увеличивает число вариантов.

В связи с отмеченными обстоятельствами объем результирующей информации резко возрастает с увеличением числа возможных вариантов, обусловленных сочетаниями перечисленных выше факторов. Поэтому в ТУ графики и номограммы приводятся обычно для одной—двух форм напряжения в простом непрерывном режиме работы при естественном охлаждении одиночных конденсаторов для максимальной температуры окружающей среды.

Так как конденсаторы имеют определенный разброс тепловых и электрических параметров и характеристик, то предельно допустимые параметры рабочего напряжения и режимов работы должны находиться с учетом предельных значений параметров и характеристик конденсаторов.

§ 7.1. Общие принципы определения допустимых параметров рабочего напряжения конденсаторов

Параметры рабочих напряжений, режимов работы и условия охлаждения должны быть такими, чтобы обеспечивалась работоспособность конденсаторов (см. § 4.8, гл. 6). Очевидно, что одни и те же гамма-процентные ресурсы τ_γ и сроки службы конденсаторов τ_c могут быть получены при различных сочетаниях условий эксплуатации.

Таким образом, задача состоит в том, чтобы определить параметры напряжения и режима работы при условии обеспечения требуемых показателей эксплуатационной надежности конденсаторов, которые в общем случае могут быть отличными от показателей в номинальном режиме.

Точное решение этой задачи на современном этапе развития теории прогнозирования надежности конденсаторов по условиям эксплуатации невозможно ввиду большого числа факторов, влияющих на ресурс конденсаторов. Многие из этих связей в настоящее время еще не установлены. Поэтому поставленная задача решается приближенно с рядом упрощающих допущений. Определяется один из параметров режима в предположении, что остальные заданы. При этом существующие модели старения конденсаторов (см. § 4.6, 6.2) рассматривают различные механизмы старения конденсаторов как независимые, хотя экспериментальные ресурсные испытания пропитанных жидкими диэлектриками конденсаторов показывают зависимость скорости старения под действием частичных разрядов от температуры (см. § 4.6). Иными словами, даже при одном преобладающем механизме старения конденсатора на показателях его долговечности существенно могут сказываться несколько режимных факторов.

Факторы, влияющие на работоспособность и долговечность конденсаторов, рассмотрены в шестой главе. Независимый учет факторов упрощает определение допустимых параметров напряжения, режима и условий охлаждения, хотя при этом, естественно, повышается погрешность в оценке ресурсов. В данной главе излагаются расчетные подходы по определению

этих параметров, исходя из следующих допущений:

1. Показатели надежности конденсаторов в эксплуатации будут неизменными при одной и той же максимальной внутренней температуре независимо от того, чем обусловлена эта температура (внутренним тепловыделением или же условиями окружающей среды).

2. Показатели этой надежности будут одинаковыми при одной и той же суммарной энергии частичных разрядов (см. § 2.4, 4.6) независимо от того, каким образом она достигается.

3. Локальные нагревы конструкции определяются энергией импульсного тепловыделения, нагрузкой конденсатора по току и его интегральным нагревом.

Основываясь на этих допущениях, условия определения допустимых параметров электрического и теплового режимов работы, а также охлаждения конденсаторов будут иметь вид:

$$P \leqslant P_{д}; \qquad (7.1.1)$$

$$W \leqslant W_{д}; \qquad (7.1.2)$$

$$q_{чр} \leqslant q_{чр.д}; \quad P_{чр} \leqslant P_{чр.д}; \qquad (7.1.3)$$

$$U_m \leqslant U_{mд}, \qquad (7.1.4)$$

где P, W, $P_{чр}$, $q_{чр}$, U_m — соответственно допустимые значения мощности тепловыделения в конденсаторе, энергии локального импульсного тепловыделения, заряда и мощности частичных разрядов, амплитуды напряжения в рассматриваемом режиме; $P_{д}$, $W_{д}$, $P_{чрд}$, $U_{mд}$ — те же предельно допустимые значения для конденсатора данной конструкции и номинальных параметров, при которых обеспечивается заданный ресурс.

При этом если параметры воздействующего на конденсатор напряжения или параметры режима работы находятся из неравенств (7.1.1)—(7.1.4), то эти параметры являются *допустимыми*. Если для их определения используются равенства из (7.1.1)—(7.1.4), то такие параметры считаются *предельно допустимыми* (или экстремальными).

Условия (7.1.1) и (7.1.2) обеспечивают допустимый тепловой режим конденсатора, (7.1.3) и (7.1.4) — его длительную и кратковременную электрическую прочность (см. § 2.4, 4.6, 6.1, 6.2). По значениям величин $P_{д}$, $W_{д}$, $q_{чр.д}$, $P_{чрд}$, $U_{mд}$ из соотношений (7.1.1)—(7.1.4), а также с учетом связи между параметрами режима работы, условиями охлаждения и величинами P, W, $P_{чр}$, $q_{чр}$, U_m из этих же соотношений можно найти экстремальные параметры напряжения режима, а также необходимые условия охлаждения конденсаторов.

Для этого следует знать электрические и тепловые параметры и характеристики конденсаторов (см. четвертую главу), а также зависимость ресурсов конденсаторов от электрических и тепловых нагрузок.

Выполнение условий (7.1.1) и (7.1.2) достигается путем удовлетворения требований, изложенных в § 6.1, а (7.1.3) и (7.1.4) — в § 6.2.

Необходимо отметить, что не для всех видов конденсаторов применяются приведенные выше, а также в § 6.1 и 6.2 условия. Так, например, для конденсаторов с оксидным диэлектриком не имеет смысла принимать во внимание условие (7.1.3), для конденсаторов с неполярным диэлектриком — (6.1.1), а для конденсаторов с фольговыми выступающими обкладками — условие (6.1.5).

Так как значение напряжения и другие параметры режима работы определяются независимо по нескольким условиям, то допустимые по одному условию параметры могут оказаться недопустимыми по другим, поэтому окончательно принимается минимальное значение (для напряжения, частоты повторения, длительности работы и т. д.) и максимальное (для длительностей фронтов, продолжительности паузы и др.).

Разумеется, расчетный путь определения предельно допустимых рабочих параметров воздействующего напряжения является приближенным, и в соответствующих случаях применения конденсаторов необходима экспериментальная проверка реального эксплуатационного ресурса конденсаторов, особенно если режим работы является форсированным.

§ 7.2. Предельно допустимые значения и частота напряжения синусоидальной формы в непрерывных режимах нагружения

Значение и частота синусоидального переменного напряжения — это те параметры режима, которые определяют мощность тепловыделения, ток, заряд и мощность частичных разрядов в конденсаторе. Поэтому предельно допустимое действующее значение рабочего напряжения находится из условий:

$$U_1 = \sqrt{\frac{P_{д}}{2\pi f C \operatorname{tg}\delta}}; \qquad (7.2.1)$$

$$U_2 = I_{д}/2\pi f C; \qquad (7.2.2)$$

$$U_3 = U_{з.д}; \qquad (7.2.3)$$

$$U_4 = U_{ч.д}, \qquad (7.2.4)$$

где $P_{д}$ — предельно допустимая мощность тепловыделения, определяемая с учетом разброса параметров и характеристик конденсаторов (см. § 6.1); f — частота напряжения; C, $\operatorname{tg}\delta$ — емкость и тангенс угла потерь конденсатора на частоте f; $I_{д}$ — предельно допустимое для данных условий охлаждения действующее значение тока, определяемое согласно § 6.1; $U_{з.д}$, $U_{ч.д}$ — предельно допустимые для конденсатора данного типа (конструкции) и номинальных параметров напряжения, определяемые из условий обеспечения необходимого запаса по кратковременной электрической прочности, и ограничения характеристик частичных разрядов на допустимом уровне (см. § 2.4, 4.6, 6.2).

Так, исходя из допущения, что ресурс конденсатора с органическим диэлектриком

в первом приближении зависит только от суммарной энергии частичных разрядов за время эксплуатации [В.6—В.8], предельно допустимое действующее значение напряжения в простом непрерывном режиме работы

$$U''_{\text{з.д}} = U'_{\text{з.д}} \left[\left(\frac{f'}{f''} \right)^n \frac{\tau'_\gamma}{\tau''_\gamma} \right]^{1/a}, \quad (7.2.5)$$

где $U''_{\text{з.д}}$ — предельно допустимое действующее значение напряжения с частотой f' в простом непрерывном режиме работы, при котором гамма-процентный ресурс конденсаторов составляет τ'_γ; τ''_γ — гамма-процентный ресурс при напряжении $U''_{\text{з.д}}$, имеющем частоту f''.

Выражение (7.2.5) справедливо, если при величинах $U'_{\text{з.д}}$ и $U''_{\text{з.д}}$ имеют место частичные разряды одного и того же характера (например, только начальные или только критические). Так как при изменении характера (и соответственно интенсивности) ЧР изменяется и показатель степени a (см. табл. 6.2), то в общем случае

$$U''_{\text{з.д}} = \left(U'_{\text{з.д}}\right)^{a'/a''} \left[\left(\frac{f'}{f''} \right)^n \frac{\tau'_\gamma}{\tau''_\gamma} \right]^{1/a''}. \quad (7.2.6)$$

Здесь считается, что значения $U'_{\text{з.д}}$ и τ'_γ известны из ресурсных испытаний конденсаторов на частоте f'. Учитывая, что погрешность определения $U''_{\text{з.д}}$ возрастает при сильном отличии τ''_γ от τ'_γ, целесообразно брать данные со значениями τ'_γ, близкими к τ''_γ. Значения $\operatorname{tg}\delta$ и C в (7.2.1) и (7.2.2) следует подставлять согласно температурно-частотным характеристикам конденсаторов (§ 4.1) при среднеобъемной температуре внутри конденсатора (см. § 5.5) на частоте f. Если допустимое напряжение определяется не для конкретного конденсатора, а для их совокупности, то эти значения должны браться для верхней границы распределения конденсаторов по этим параметрам (см. § 4.1).

Предельную частоту, при которой допустима работа конденсатора с заданным напряжением, находят по следующим выражениям:

$$f_1 = \frac{P_\text{д}}{2\pi U^2 C \operatorname{tg}\delta}; \quad (7.2.7)$$

$$f_2 = I_\text{д}/2\pi UC; \quad (7.2.8)$$

$$f''_3 = f'_3 \left[\frac{\left(U'_3\right)^{a'} \tau'_\gamma}{(U)^{a''} \tau''_\gamma} \right]^{1/n}, \quad (7.2.9)$$

где U — действующее значение напряжения в режиме с искомой частотой f.

В выражении (7.2.9) значения величин те же, что и в (7.2.6).

Пример 1. Необходимо определить предельно допустимое рабочее напряжение конденсатора типа КСК1-0,66-40-2У1 при частоте $f''=400$ Гц, $\tau''_\gamma = 10^5$ ч и принудительном воздушном охлаждении $V_\text{о}=2$ м/с и $T_{\text{о max}}=+35$°С.

Предельно допустимая максимальная температура для бумажно-полипропиленового диэлектрика с жидкой пропиткой в длительном тепловом режиме $T_{m\text{д}}=90$°С (табл. 6.1.2). Наружное тепловое сопротивление конденсатора при принудительном воздушном охлаждении конденсатора со скоростью $V_\text{о}=2$ м/с определяем приближенно. Согласно данным рис. 4.4.7, $R_{\text{т.н}}$ принимаем равным 0,3 от $R_{\text{т.н}}=0{,}24$ К/Вт при естественном охлаждении (см. табл. 4.4.1). Тогда полное максимальное тепловое сопротивление составит:

$$R_{\Sigma m} = R_{\text{т.в}m} + R_{\text{т.н}} \approx 0{,}23 \text{ К/Вт},$$

где $R_{\text{т.в}m}=0{,}16$ К/Вт по данным табл. 4.4.1.

Согласно (6.1.6), мощность тепловыделения

$$P_\text{д} = \frac{90-35}{0{,}23} = 240 \text{ Вт}.$$

Предельно допустимую мощность тепловыделения в рассматриваемом конденсаторе исходя из условия обеспечения его термостабильности (см. § 4.5, 6.1) определим, используя ориентировочные данные по величине среднего теплового сопротивления $R_{\text{т.с}} = R_{\text{т.в.с}} + R_{\text{т.н}} \approx 0{,}21$ К/Вт коэффициента $a=3\cdot10^{-4}$ и $T_1=70$°С, найденные по кривой температурной зависимости $\operatorname{tg}\delta$. Согласно (4.5.1)

$$P_{0\,\text{кр}} = \frac{70-35+\sqrt{35^2+\dfrac{1}{3\cdot10^{-4}}}}{2\cdot0{,}21} = 245 \text{ Вт};$$

по (4.5.2)

$$T_{\text{с.кр}} = 70 + \frac{1}{2\cdot3\cdot10^{-4}\cdot0{,}18\cdot0{,}18\cdot287} = 97\text{°С};$$

по (4.5.3)

$$P_\text{кр} = \frac{97-35}{0{,}21} = 295 \text{ Вт}.$$

В соответствии с (6.1.1) находим

$$P_\text{д} = \frac{295}{1{,}1} = 268 \text{ Вт},$$

где $k_\text{э}=1{,}1$ из табл. 6.1.1. Окончательно в качестве предельно допустимого принимается значение $P_\text{д}=240$ Вт, найденное из условия (6.1.2), как меньшее из двух значений $P_\text{д}$. Тогда по условию (7.2.1) допустимое действующее значение напряжения будет

$$U_1 = \sqrt{\frac{240}{2\pi\cdot400\cdot293\cdot10^{-6}\cdot0{,}002}} = 405\text{В},$$

где

$$C_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{н}}}{U_{\text{н}}^2 \cdot 2\pi f_{\text{н}}} = \frac{40 \cdot 10^3}{660^2 \cdot 2\pi \cdot 50} = 293 \text{ мкФ};$$

величина $\operatorname{tg}\delta = 0{,}002$ принята равной $\operatorname{tg}\delta$ на частоте 50 Гц, так как частная зависимость $\operatorname{tg}\delta$ конденсаторов этого типа не нормируется и для бумажно-полипропиленового диэлектрика слабо зависит от частоты в диапазоне 10^2—10^3 Гц (см. § 4.1).

Допустимое действующее значение тока находим с учетом допустимой перегрузки по току: $I = 1{,}3 \cdot 60{,}5 = 79$ А, где 60,5 А — номинальное действующее значение тока конденсатора. Согласно условию (7.2.2)

$$U_2 = \frac{79}{2 \cdot 400 \cdot 293 \cdot 10^{-6}} = 107 \text{ В}.$$

Определять значения U_3 и U_4 здесь не имеет смысла, так как они явно будут больше. Таким образом, для конденсатора КСК1-0,66-40-2У1 в указанных условиях предельно допустимым рабочим напряжением будет напряжение $U = 107$ В.

Пример 2. Необходимо определить предельно допустимое напряжение для конденсатора К75-10-250 В-10 мкФ в простом непрерывном режиме работы при $T_{\text{о max}} = +40$°С (охлаждение естественное), частоте $f = 10^4$ Гц и $\tau_{\text{у}} = 10^4$ ч.

По формуле (6.1.6) § 6.1 находим предельно допустимую мощность тепловыделения

$$P_1 = \frac{105 - 40}{15{,}6} = 4{,}16 \text{ Вт},$$

где $T_{m\text{д}} = 105$°С (табл. 6.1.2) и $R_{\text{т}m} = 15{,}6$ К/Вт (пример 1, § 6.1). Критическую мощность тепловыделения в конденсаторе определяем согласно данным § 4.5:

$$P_{0\text{кр}} = \frac{70 - 40 + 30^2 + \dfrac{1}{1{,}6 \cdot 10^3}}{2 \cdot 1{,}3} = 2{,}7 \text{ Вт},$$

где $R_{\text{т.с}} = 13$°С/Вт (пример 1, § 6.1);

$$T_{\text{с.кр}} = 70 + \frac{1}{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot 13 \cdot 2{,}7} = 79\text{°С};$$

$$P_{\text{кр}} = \frac{79 - 40}{13} = 3 \text{ Вт}.$$

Учитывая необходимый запас (табл. 6.1.1), предельно допустимая мощность тепловыделения составит

$$P_{2\text{д}} = \frac{3{,}4}{1{,}2} = 2{,}5 \text{ Вт}.$$

Из двух найденных значений $P_{\text{д}}$ выбираем меньшее. Тогда из условия (7.2.1)

$$U_1 = \frac{2{,}5}{2\pi \cdot 10^4 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-2}} = 22{,}4 \text{ В},$$

где $0{,}8 \cdot 10^{-2}$ — тангенс угла потерь конденсатора при $f = 10^4$ Гц и $T_{\text{с}} = 40 + 2{,}5 \cdot 13 = 73$°С.

Предельно допустимое действующее значение тока находим согласно выражению (6.1.13), полагая $T_{m\text{д}} = 105$°С, $T_1 = 85$°С, $T_2 = T_{\text{о max}} + PR_{\text{т.н}} = 40 + 2{,}5 \cdot 5 \approx 53$°С:

$$I_{\text{д}} = 12 \cdot \sqrt{\frac{105 - 53}{105 - 85}} = 19{,}4 \text{А}.$$

Из (7.2.2)

$$U_2 = \frac{19{,}4}{2\pi \cdot 10^4 \cdot 10^{-5}} = 31 \text{ В}.$$

По условиям (7.2.3) и (7.2.4) значения U_3 и U_4 будут заведомо больше чем U_1. Таким образом, в заданных условиях лимитирующим фактором является мощность тепловыделения, предельно допустимым рабочим напряжением принимается $U = 22$ В.

Пример 3. Определить для конденсатора КСК1-0,66-40-2У1 при указанных в примере 1 условиях предельную частоту, на которой конденсатор допускает работу при номинальном напряжении. Учитывая результаты расчета в примере 1 по выражению (7.2.8), определяем

$$f_1 = \frac{240}{2\pi \cdot 660^2 \cdot 293 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 150 \text{Гц};$$

$$f_2 = \frac{79}{2\pi \cdot 660 \cdot 293 \cdot 10^{-6}} = 65 \text{ Гц}.$$

Из условия (7.2.9), полагая для упрощения $n = 1$ (см. § 2.4), находим значение частоты

$$f_3'' = 50 \cdot \frac{0{,}66^{9{,}4} \cdot 10^5}{0{,}66^{9{,}4} \cdot 10^4} = 500 \text{ Гц}.$$

Поэтому окончательно принимаем предельно допустимую для заданных условий частоту $f = f_2 = 65$ Гц как минимальную из всех полученных частот.

При сложных непрерывных режимах в случае циклического характера изменения параметров воздействующего напряжения предельно допустимое рабочее напряжение или частота рассчитываются по приведенным выше соотношениям. В них подставляются допустимая мощность тепловыделения и действующее значение тока, определяемые в соответствии с рекомендациями § 6.1. При сложных непрерывных режимах с произвольным законом изменения параметров воздействующего на конденсатор напряжения (в предельном случае эти изменения могут носить случайный характер) расчет допустимых параметров усложняется. В таких случаях, задавшись базовыми значениями этих параметров и зная закон изменения относительных значений параметров напряжения во времени, с помощью ЭВМ рассчитывается изменение максимальной внутренней температуры конденсатора во времени. Далее, учитывая, что мощность тепловыделения пропорциональна квадрату напряжения, его частоте, и $\operatorname{tg}\delta$, определяется предельно допустимое

напряжение ($U_д$) или частота ($f_б$) по отношению к базовым:

$$U_д^2 f_д \mathrm{tg}\delta_д / U_б^2 f_б \mathrm{tg}\delta_б = T_{mд}/T_{mб}, \quad (7.2.10)$$

где $T_{mб}$ — максимальная температура внутри конденсатора в базовом режиме, полученная в результате расчета на ЭВМ (см. приложение 5); $T_{mд}$ — предельно допустимая максимальная температура внутри конденсатора (см. табл. 6.1.2); $U_б$, $f_б$, $\mathrm{tg}\delta_б$ — напряжение, частота и тангенс угла потерь конденсатора в базовом режиме.

Определение величины $U_{з.д}$ для конденсаторов с органическими диэлектриками в непрерывном режиме с циклическим изменением параметров воздействующего напряжения также осуществляется согласно допущению, что ресурс конденсатора в первом приближении определяется суммарной энергией частичных разрядов за время его эксплуатации (см. § 4.6, 6.2).

Исходя из этого допущения, ориентировочное значение предельно допустимого действующего значения напряжения на интервале работы t_{p2} может быть найдено из равенства

$$\left[(U_{p1})^{a''_{p1}} f_{p1}^{n} \frac{t_{p1}}{T_ц} + (U_{p2})^{a''_{p2}} f_{p2}^{n} \frac{t_{p2}}{T_ц} \right] \tau''_ɣ = \left(U'_{з.д}\right)^{a'} f^{n} \tau'_ɣ. \quad (7.2.11)$$

Здесь $\tau''_ɣ$ — ресурс конденсатора в непрерывном режиме работы с циклическими изменениями действующего значения напряжения и частоты (U_{p1}, f_{p1}, U_{p2}, f_{p2}); $\tau''_ɣ$ — ресурс конденсатора в простом непрерывном режиме при частоте f и напряжении $U'_{з.д}$. В правой части соотношения (7.2.11) обычно находятся данные номинального режима работы, или же данные по ускоренным ресурсным испытаниям конденсаторов при форсировании старения под действием частичных разрядов за счет напряжения и частоты (см. § 6.2).

Пример 4. Необходимо определить предельно допустимое напряжение синусоидальной формы частотой 50 Гц на интервале времени с циклическим изменением действующего значения напряжения для конденсатора КСК1-0,66-40-2У1 при следующих условиях: $P_1=80$ Вт, $t_{p1}=60$ мин, $t_{p2}=40$ мин, естественном воздушном охлаждении $T_{o\,max}=+45°C$, $\tau_ɣ=10^4$ ч.

Так как охлаждение естественное, то полное максимальное тепловое сопротивление конденсатора принимаем равным $R_{Tm} \approx 0{,}16+0{,}24=0{,}4$ К/Вт. Тепловая постоянная времени конденсатора $\tau_T = 145$ мин согласно данным § 4.4 (табл. 4.4.5).

По выражению (6.1.11) предельно допустимая мощность тепловыделения на интервале времени t_{p2} в заданных условиях, учитывая, что $T_{mд}=95°C$ (табл. 6.1.2), равна

$$P_э = [(95-45)(1-e^{-100/145}) - 80 \cdot 0{,}4(e^{-40/145} - e^{-100/145})]/0{,}4\,(1-e^{-40/145}) \approx 146\,\text{Вт}.$$

По (7.2.1) значение

$$U_1 = \sqrt{\frac{146}{2\pi \cdot 50 \cdot 293 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-3}}} \approx 900\,\text{В}.$$

По (7.2.2) значение

$$U_2 = \frac{1{,}3 \cdot 60{,}5}{2\pi \cdot 50 \cdot 293 \cdot 10^{-6}} = 855\ \text{В}.$$

Здесь 1,3 — коэффициент допустимой длительной перегрузки по току конденсаторов типа КСК.

Для определения действующего значения напряжения на основе равенства (7.2.11) предварительно найдем

$$U_{p1} = \sqrt{\frac{80}{2\pi \cdot 50 \cdot 293 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-3}}} = 670\,\text{В}.$$

Допустим, что как при U_{p1}, так и при U_{p2} в конденсаторе будут иметь место начальные частичные разряды. Тогда из (7.2.11) при $f_{p1}=f_{p2}=f$, $a''_{p1}=a''_{p2}=a'=9{,}4$, $\tau'_ɣ = 15$ лет и $\tau''_ɣ = 10^4$ ч будем иметь

$$U_{p2} = U_{p1} \sqrt[a']{\left(\frac{U'_{з.д}}{U_{p1}}\right)^{a'} \frac{\tau'_ɣ}{\tau''_ɣ} \frac{T_ц}{t_{p2}} - \frac{t_{p1}}{t_{p2}}} = 670 \sqrt[9{,}4]{\left(\frac{660}{670}\right)^{9{,}4} \cdot \frac{132 \cdot 10^4}{10^4} \cdot \frac{10^2}{40} - \frac{60}{40}} \approx 1220\ \text{В}.$$

Найденное выше напряжение 855 В окончательно принимается как предельно допустимое в заданных условиях. Таким образом, в заданных условиях фактором, лимитирующим предельно допустимое рабочее напряжение, является локальное тепловыделение, связанное с током конденсатора.

Предельно допустимые рабочие напряжения синусоидальной формы в нормативно-технической документации обычно задают в виде графиков для непрерывного простого режима электрического нагружения при естественном воздушном охлаждении и максимальной температуре охлаждающей среды.

Конденсаторы часто используют в составе батарей, поэтому для них целесообразно иметь графики, отражающие ухудшение или улучшение условий теплоотвода при работе в блоках и в случае принудительного воздушного охлаждения (см. приложение 6).

§ 7.3. Предельно допустимые значения и частота напряжения синусоидальной формы в прерывистых режимах нагружения

В таких режимах на конденсатор воздействуют радиоимпульсы и пачки радиоимпульсов (см. § 5.1).

Расчет предельно допустимой величины и частоты напряжения в подобных режимах, исходя из теплового режима работы конденсаторов, производится по соотношениям из §7.2 с учетом того, что предельно допустимая мощность тепловыделения и действующее значение тока для подстановки в эти формулы определяются с учетом прерывистого характера электрических нагрузок (см. § 6.1).

Так как данные величины в прерывистых режимах возрастают по сравнению с непрерывными, то соответственно увеличиваются предельно допустимые рабочие напряжения конденсаторов по отношению к рабочим напряжениям в непрерывных режимах работы. Поэтому в прерывистых режимах работы конденсаторы обладают более высокими удельными параметрами (см. § 4.7).

Рассматривая прерывистый режим работы как частный случай непрерывного с циклическим изменением величины воздействующего напряжения (см. § 7.2), при $U_{p2}=0$ из соотношения (7.2.11) получаем предельно допустимое действующее значение напряжения в прерывистом режиме. В соотношении (7.2.11) при этом $U'_{з.д}$ — предельно допустимое действующее значение напряжения с частотой f в простом непрерывном режиме работы конденсаторов, имеющих в этом режиме гамма-процентный ресурс τ'_γ; τ''_γ — гамма-процентный срок службы конденсаторов в прерывистом режиме; f_{p1} — частота напряжения в прерывистом режиме. Значения коэффициентов a', a'' и n приведены в табл. 6.2.5, причем значение величины a' берется в соответствии с $U'_{з.д}$, а a'' — согласно $U''_{з.д}$. Так как до расчета по (7.2.6) величина $U''_{з.д}$ неизвестна, то предварительно принимается $a''=a'$. Поскольку в прерывистых режимах напряжение действует на конденсатор не постоянно, а только на интервале времени $t_р$, то при одинаковых ресурсах $\tau''_\gamma = \tau'_\gamma$ гамма-процентный срок службы конденсаторов в прерывистых режимах будет больше, чем в непрерывном в $T_ц/t_р$ раз (если старение конденсаторов происходит под действием ЧР). Это обуславливает дополнительную возможность форсировать по напряжению режим работы конденсаторов. В прерывистых режимах с коротким интервалом работы ($t_р$ — секунды — минуты) и большим периодом ($T_ц$ — десятки—сотни минут) для конденсаторов с органическим диэлектриком и жидкой пропиткой имеется возможность дополнительного форсирования режима по напряжению, если учесть, что напряжение возникновения ЧР, упавшее после кратковременной работы при интенсивных частичных разрядах (критических ЧР), затем восстанавливается [В.6, В.7].

При низкой частоте напряжения радиоимпульса, большом периоде $T_ц$ и очень малых по сравнению с длительностью $T_ц$ временах работы $t_р$, особенно когда требуются относительно небольшие сроки службы конденсаторов, главным, лимитирующим величину напряжения, фактором может стать кратковременная электрическая прочность конденсатора — см. условие (7.1.4). Конкретные численные значения $U_{ч.д}$ зависят от номинального напряжения конденсатора, его конструкции, параметров режима нагруженя, а также — максимальной внутренней температуры конденсатора.

В качестве граничных (сверху) значений $U_{ч.д}$ (при малых значениях $t_р$) могут быть приняты испытательные напряжения синусоидальной формы (см. § 4.6). Нижней границей напряжения $U_{ч.д}$ радиоимпульса при больших значениях $t_р$ можно принять номинальное напряжение конденсаторов, рассчитанных на работу при переменном напряжении.

Исходя из зависимости пробивного напряжения диэлектриков от времени выдержки при переменном напряжении (см. § 4.6), зависимость $U_{ч.д}$ от $t_р$ при $t_р>1$ с может быть приближенно выражена как

$$\lg U_{ч.д} = (1-K\lg t_р)\lg U_и, \qquad (7.3.1)$$

где $U_и$ — испытательное переменное напряжение конденсатора; $t_р$ — длительность работы в цикле нагружения, с.

Коэффициент K зависит от конструкции конденсаторов (табл. 7.3.1).

Так как пробивное напряжение конденсаторов зависит от максимальной внутренней температуры, частоты напряжения и емкости (площади обкладок) (см. § 4.6), то эти зависимости также необходимо учитывать при определении величины $U_{ч.д}$.

В упомянутых выше режимах, но при относительно высокой частоте напряжения радиоимпульса (тысячи и десятки тысяч герц), кроме лимитирующих факторов, которые перечислены выше, для конденсаторов с металлизированными обкладками может потребоваться ограничение напряжения U, исходя из условия (6.1.5). С учетом (6.1.14) предельно допустимое действующее значение напряжения по этому условию равно:

$$U_{5д} = \frac{\Gamma\sqrt{2}}{\pi\sqrt{f}}, \qquad (7.3.2)$$

где Γ — коэффициент, приведенный в табл. 6.1.7; f — частота напряжения, Гц.

Пример 1. Необходимо определить предельно допустимое рабочее напряжение для конденсатора К75-10-250В-10 мкФ в условиях пример 1 § 6.1, если частота синусоидального напряжения составляет 10 кГц.

Согласно примеру 1 § 6.1 предельно допустимая мощность тепловыделения и действующее значение тока в прерывистом

Таблица 7.3.1

Конструкция конденсаторов	Коэффициент K
Бумажно-фольговые с жидкой пропиткой	0,13
Бумажно-пленочные и пленочные с фольговыми обкладками и жидкой пропиткой	0,06
Металлобумажные конденсаторы	0,02
Конденсаторы с комбинированным диэлектриком и металлизированными обкладками	0,01
Конденсаторы с пленочным диэлектриком и металлизированными обкладками	0,03

циклическом режиме составляют 18 Вт и 21 А. Средняя по объему и времени температура внутри конденсатора $(T_c)_{ср}$ для повторно-кратковременного теплового режима около 80°С (рассчитана согласно § 5.5). При этой температуре предельное значение tgδ конденсатора на частоте 10^4 Гц согласно справочным данным равно $0{,}8\cdot10^{-2}$.

Тогда по (7.2.1)

$$U_1 = \sqrt{\frac{18}{2\pi\cdot10^4\cdot10\cdot10^{-6}\cdot0{,}8\cdot10^{-2}}} = 60\text{ В}.$$

По (7.2.2)

$$U_1 = \frac{21}{2\pi\cdot10^4\cdot10\cdot10^{-6}} = 35\text{ В}.$$

Таким образом, лимитирующим напряжение конденсатора фактором в заданных условиях является локальное тепловыделение в контактном узле.

Поскольку мощность тепловыделения при $U=35$ В примерно в три раза меньше, чем при $U=60$ В, необходимо уточнить предельно допустимое действующее значение тока. Для этого согласно данным § 6.1 определяем максимальную температуру корпуса в повторно-кратковременном режиме при напряжении $35<U<60$ В.

Приняв $U = \dfrac{U_1+U_2}{2} = 47$ В, находим

$$T_к = 40 + 18\left(\frac{47}{60}\right)^2 5\cdot\frac{2}{10} = 51°\text{С}.$$

Тогда

$$I_д = 12\sqrt{\frac{105-51}{105-85}\cdot\frac{1-\exp(-10/1{,}5)}{1-\exp(-2/1{,}5)}} = 22{,}8\text{ А}.$$

При таком токе $U_2=37$ В. Приняв $U_2=(47+37)/2=42$ В, получим $T_к=49$°С, $I_д=23{,}4$ А, откуда $U_2\approx37{,}4$ В. Дальнейшее уточнение даст значение $I_д=24$ А и $U=38$ В.

Предельно допустимые напряжения на конденсаторе из условий (7.1.3) и (7.1.4) не определяем, так как в заданном режиме они заведомо будут больше, чем величины U_1 и U_2. Из условия (7.3.2) получаем

$$U_3 = \frac{0{,}03\sqrt{2}\cdot10^6}{\pi\sqrt{10^4}} = 135\text{ В}.$$

Окончательное в качестве предельно допустимого напряжение в заданных условиях для конденсатора К75-10-250В-10 мкФ принимаем наименьшее из трех полученных, т. е. $U=U_2=38$ В.

Пример 2. Те же условия, что и в примере 1, но частота $f=250$ Гц. По (7.2.1) величина $U_1=460$ В. Согласно (7.2.2), $U_2=1340$ В.

Значение U, лимитируемое мощностью частичных разрядов, найдем из выражения (7.2.11), полагая $U_{p2}=0$, $a'=a''=0$, $n=1$ (см. § 6.2), $f=50$ Гц, $f_{p1}=250$ Гц, $t_{p1}/T_ц=2/10$. Напряжение $U_{з.д}$ для конденсаторов рассматриваемого типа согласно справочным данным при $T_{o\,max}=+40$°С можно принять равным 1,2 $U_н$ при $\tau_ч = 3\cdot10^3$ ч. Тогда

$$U_3 = 1{,}2\cdot250\sqrt[6]{\frac{50}{250}\cdot\frac{10}{2}\cdot\frac{3\cdot10^3}{10^4}} = 260\text{ В}.$$

По (7.3.2)

$$\lg U_{ч.д} = (1-0{,}01\lg120)\lg(1{,}5\cdot250);$$

$$U_{ч.д} = 330\text{ В}.$$

Таким образом, при $f=250$ Гц фактором, ограничивающим предельно допустимое рабочее напряжение, в рассматриваемом режиме служат ЧР.

В ряде практических случаев заданными являются действующее значение напряжения и параметры режима нагружения ($t_р$, $T_ц$), а определению подлежит частота f. Так как факторов, влияющих на работоспособность конденсатора, несколько, то предельно допустимая частота f находится с учетом каждого из них.

Предельно допустимой частотой окончательно считается минимальная из всех полученных.

Пример 3. Условия те же, что в примере 1 § 6.1, но $U=300$ В. Необходимо определить предельно допустимую частоту f напряжения в радиоимпульсе.

Исходя из условия (7.2.1) находим $f_1 = \dfrac{P_д}{U^2 2\pi C\operatorname{tg}\delta}$. Так как частота f нам неизвестна, то значение tgδ вначале принимаем равным тангенсу угла потерь на частоте $f=10^3$ Гц (или на любой другой частоте) при $T_c=70$°С (или при любой другой температуре, находящейся в пределах

$T_{0\,max} \div T_{тд}$, поскольку значение f выбрано произвольно). Тогда

$$f_1' = \frac{18}{300^2 \cdot 2\pi \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}3 \cdot 10^{-2}} = 1060 \text{Гц}.$$

При мощности тепловыделения в 18 Вт средняя температура внутри конденсатора согласно § 5.5 составит

$$T_c = T_{0\,max} + PR_{т.с}\frac{t_p}{T_ц} =$$

$$= 40 + 18 \cdot 13 \cdot \frac{2}{10} = 87°\text{C},$$

где $R_{т.с} = 13$ К/Вт — стационарное полное среднее тепловое сопротивление конденсатора.

По характеристике $\operatorname{tg}\delta(f)$ при этой температуре и частоте f_1' находим значение тангенса угла потерь конденсатора. Согласно найденному значению $\operatorname{tg}\delta$ определяем

$$f_1'' = \frac{18}{300^2 \cdot 2\pi \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}4 \cdot 10^{-2}} = 1330 \text{ Гц}.$$

Дальнейшее уточнение частоты f_1 не производим.

Исходя из условия (7.1.2), находим

$$f_2 = \frac{I_д}{U \cdot 2\pi C} = \frac{24}{300 \cdot 2\pi \cdot 10^{-5}} = 1280 \text{ Гц}.$$

Корректировку предельно допустимого действующего значения тока f_2 (см. § 6.1) не производим, так как при f_2 мощность тепловыделения незначительно отличается от мощности при f_1''.

Предельно допустимую частоту из условия (7.1.3) определим, используя соотношение (7.2.11) при $U_{2p} = 0$.

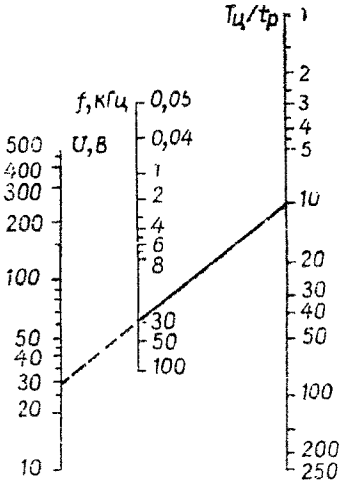


Рис. 7.3.1. Номограмма для определения допустимого рабочего напряжения конденсатора К75-10-500В-3,3 мкФ при его работе в простом прерывистом режиме нагружения с естественным воздушным охлаждением при $T_{c\,max} = 70°\text{C}$

Полагая для простоты $n = 1$ (этим условие определения f ужесточается), получаем

$$f_3 = \left(\frac{U_{з.л}}{U}\right)^{a'} \frac{f\tau_\gamma' T_ц}{\tau_\gamma'' t_p} =$$

$$= \left(\frac{1{,}2 \cdot 250}{300}\right)^6 \frac{50 \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot 10}{2 \cdot 10^4} = 75 \text{ Гц}.$$

Здесь выражение $\tau_\gamma' = 3 \cdot 10^3$ ч взято из справочных данных при $U = 1{,}2\ U_н$ и $T_0 = +40°\text{C}$, так как мощность P при этой частоте незначительна.

Таким образом, в качестве предельно допустимой частоты синусоидального напряжения в заданных условиях принимается $f = 75$ Гц, т. е. в данном случае ограничивающим частоту напряжения фактором послужила мощность частичных разрядов.

Для определения допустимого рабочего напряжения в прерывистых режимах электрического нагружения удобно применение различного рода номограмм, например, в виде, представленном на рис. 7.3.1 [3.5].

§ 7.4. Предельно допустимые параметры несинусоидального напряжения типовых форм в непрерывных режимах нагружения

Особенностью определения допустимых параметров таких напряжений является то, что они характеризуются бо́льшим числом параметров (см. § 5.1), влияющих на мощность тепловыделения (см. § 5.3), действующее значение тока (см. § 5.2) и т. д.

Как и в случае синусоидального напряжения, при типовых формах напряжения его предельно допустимые параметры должны находиться из условий, изложенных в § 7.1.

Определению подлежит один из параметров типовой формы, например, его полный размах $U_{п.п}$ (см. § 5.1), частота повторения $f_п$ или длительность фронта $t_ф$, и т. д. Остальные параметры, а также условия охлаждения должны быть известны (заданы). Для определения предельно допустимых параметров воздействующего на конденсатор напряжения, по условию из ограничения мощности тепловыделения, предварительно находится предельно допустимое для непрерывного режима работы значение этой мощности (см. § 6.1). Далее, имея зависимость мощности тепловыделения от параметров напряжения (см. табл. 5.3.2), данные параметры могут быть найдены из равенства этой мощности и предельно допустимой. Наиболее легко при этом для типовых форм определяется предельно допустимое (согласно условию 7.1.1) в простом непрерывном режиме работы значение полного размаха напряжения $U_{п.п}'$ (табл. 7.4.1). Другие параметры напряжения (частота повторения $f_п$, дли-

Таблица 7.4.1

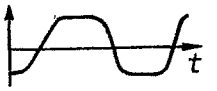
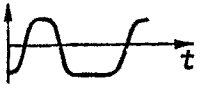
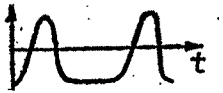
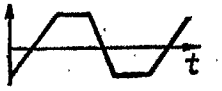
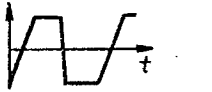
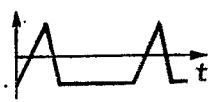
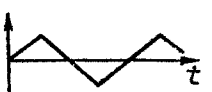
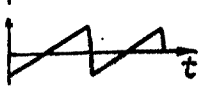
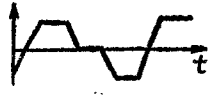
Номер рисунка	Форма напряжения	Параметр формы напряжения	$U_{\text{п.п.д}}$, В	Средняя частота, Гц
5.1.2, *а*		$t_{\text{ф}1} = t_{\text{ф}2} = t_{\text{ф}}$ $t_{\text{в}1} = t_{\text{в}2}$	$\sqrt{\frac{P_{\text{д}}}{1{,}5 f_{\text{п}} C \operatorname{tg}\delta_{\text{c}} \lg \frac{1{,}8}{f_{\text{п}} t_{\text{ф}}}}}$	$\sqrt{\frac{f_{\text{п}}}{2t_{\text{ф}}}}$
		$t_{\text{ф}1} = t_{\text{ф}2} = t_{\text{ф}}$ $t_{\text{в}1} \neq t_{\text{в}2}$	$\sqrt{\frac{P_{\text{д}}}{1{,}4 f_{\text{п}} C \operatorname{tg}\delta_{\text{c}} \lg \frac{t_{\text{в}1} + t_{\text{ф}}}{0{,}17 t_{\text{ф}}}}}$	$\sqrt{\frac{f_{\text{п}}}{2t_{\text{ф}}}} \div \frac{0{,}3}{t_{\text{ф}}}$
5.1.2, *б*		$t_{\text{ф}1} = t_{\text{ф}2} = t_{\text{ф}}$ $t_{\text{в}1} = 0$	$\sqrt{\frac{P_{\text{д}}}{1{,}1 f_{\text{п}} C \operatorname{tg}\delta_{\text{c}}}}$	$\frac{0{,}3}{t_{\text{ф}}}$
		$t_{\text{ф}1} = t_{\text{ф}2} = t_{\text{ф}}$ $t_{\text{в}1} = t_{\text{в}2}$	$\sqrt{\frac{P_{\text{д}}}{1{,}5 f_{\text{п}} C \operatorname{tg}\delta_{\text{c}} \lg \frac{1{,}4}{f_{\text{п}} t_{\text{ф}}}}}$	$\sqrt{\frac{f_{\text{п}}}{2t_{\text{ф}}}}$
		$t_{\text{ф}1} = t_{\text{ф}2} = t_{\text{ф}}$ $t_{\text{в}1} \neq t_{\text{в}2}$	$\sqrt{\frac{P_{\text{д}}}{1{,}4 f_{\text{п}} C \operatorname{tg}\delta_{\text{c}} \lg \frac{t_{\text{в}1} + t_{\text{ф}}}{0{,}22 t_{\text{ф}}}}}$	$\sqrt{\frac{f_{\text{п}}}{2t_{\text{ф}}}} \div \frac{0{,}3}{t_{\text{ф}}}$
		$t_{\text{ф}1} = t_{\text{ф}2} = t_{\text{ф}}$ $t_{\text{в}1} = 0$	$\sqrt{\frac{P_{\text{д}}}{0{,}9 f_{\text{п}} C \operatorname{tg}\delta_{\text{c}}}}$	$\frac{0{,}3}{t_{\text{ф}}}$
		$t_{\text{ф}1} = t_{\text{ф}2} = \frac{1}{2f_{\text{п}}}$ $t_{\text{в}1} = t_{\text{в}2} = 0$	$\sqrt{\frac{P_{\text{д}}}{0{,}54 f_{\text{п}} C \operatorname{tg}\delta_{\text{c}}}}$	$f_{\text{п}}$
5.1.2, *в*		$t_{\text{ф}} > t_{\text{ф}2} = t_{\text{ф}}$ $t_{\text{в}1} = t_{\text{в}2} = 0$	$\sqrt{\frac{P_{\text{д}}}{0{,}73 f_{\text{п}} C \operatorname{tg}\delta_{\text{c}} \left(\frac{1/f_{\text{п}}}{1/f_{\text{п}} - t_{\text{ф}}}\right)^2 \lg \frac{0{,}7}{f_{\text{п}} t_{\text{ф}}}}}$	$f_{\text{п}} \div \frac{0{,}11}{t_{\text{ф}}}$
		$t_{\text{ф}1} = t_{\text{ф}2} = t_{\text{ф}3}$	$\sqrt{\frac{P_{\text{д}}}{1{,}1 f_{\text{п}} C \operatorname{tg}\delta_{\text{c}} \lg \frac{1{,}2}{f_{\text{п}} t_{\text{ф}}}}}$	$\sqrt{\frac{f_{\text{п}}}{t_{\text{ф}}}}$

Таблица 7.4.2

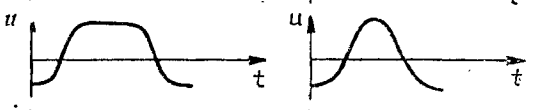
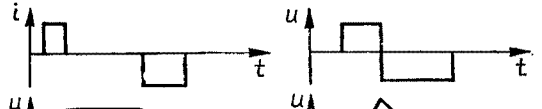
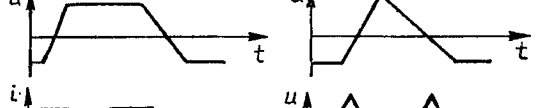
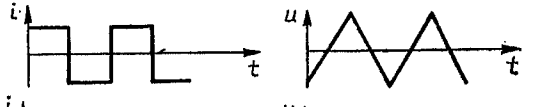
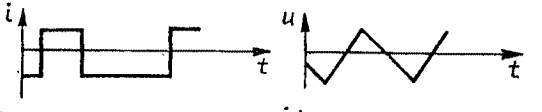
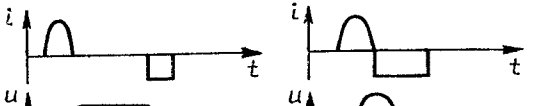
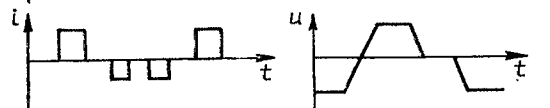
Форма тока и напряжения конденсатора	Параметр формы	$U_{\text{п.п.д}}$, В
	$t_{\phi 1} = t_{\phi 2} = t_{\phi}$	$\frac{2I_{\text{д}}}{\pi C}\sqrt{\frac{t_{\phi}}{f_{\text{п}}}}$
	$t_{\phi 1} \neq t_{\phi 2}$	$\frac{2\sqrt{2}I_{\text{д}}}{\pi C}\sqrt{[f_{\text{п}}(1/t_{\phi 1} + 1/t_{\phi 2})]^{-1}}$
	$t_{\phi 1} = t_{\phi 2} = t_{\phi}$	$\frac{I_{\text{д}}}{\sqrt{2}C}\sqrt{t_{\phi} f_{\text{п}}}$
	$t_{\phi 1} \neq t_{\phi 2}$	$\frac{I_{\text{д}}}{C}\sqrt{[f_{\text{п}}(1/t_{\phi 1} + 1/t_{\phi 2})]^{-1}}$
	$t_{\phi 1} = t_{\phi 2} = \frac{1}{2f_{\text{п}}}$	$\frac{I_{\text{д}}}{2Cf_{\text{п}}}$
	$t_{\phi 1} = \frac{1}{f_{\text{п}}} - t_{\phi 2}$	$\frac{I_{\text{д}}}{C}\sqrt{\left[f_{\text{п}}\left(1/t_{\phi 1} + \frac{f_{\text{п}}}{1 - f_{\text{п}}\, t_{\phi 1}}\right)\right]^{-1}}$
	$t_{\phi 1} = t_{\phi 2}$ $t_{\phi 1} \neq t_{\phi 2}$	$\frac{I_{\text{д}}}{C}\sqrt{\left[f_{\text{п}}\left(\frac{\pi^2}{8t_{\phi 1}} + \frac{1}{t_{\phi 2}}\right)\right]^{-1}}$
	$t_{\phi 1} = t_{\phi 2} = t_{\phi 3} = t_{\phi}$ $I_{m1} = 2I_{m2} = 2I_{m3}$	$\frac{I_{\text{д}}}{C}\sqrt{\frac{2}{3}\frac{t_{\phi}}{f_{\text{п}}}}$

Таблица 7.4.3

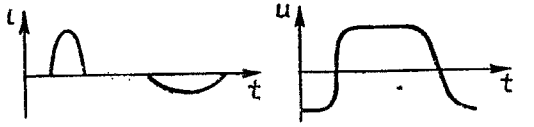
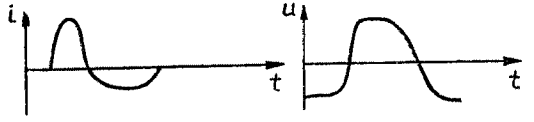
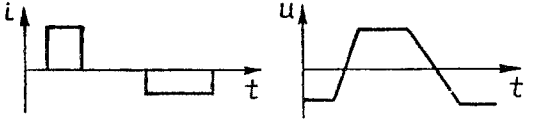
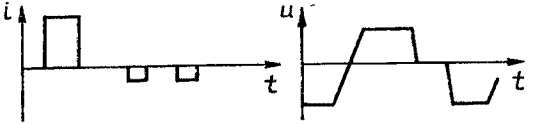
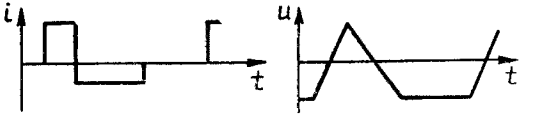
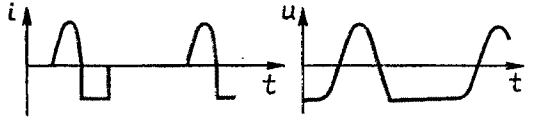
Форма тока и напряжения конденсатора	Параметр формы	$U_{\text{п.п.д}}$, В
	$t_{\phi 1} = t_{\phi 2} = t_{\phi}$ $t_{\phi 1} \neq t_{\phi 2};\ t_{\phi 2} = t_{\phi \min}$	$0{,}9\Gamma\sqrt{t_{\phi}}$
	$t_{\phi 1} = t_{\phi 2}$ $t_{\phi 1} \neq t_{\phi 2}$	$0{,}9\Gamma\sqrt{\left(\frac{1}{t_{\phi 1}}+\frac{1}{t_{\phi 2}}\right)^{-1}}$
	$t_{\phi 1} = t_{\phi 2} = t_{\phi}$ $t_{\phi 1} \neq t_{\phi 2};\ t_{\phi} = t_{\phi \min}$	$\Gamma\sqrt{t_{\phi}}$
	$t_{\phi 1} = t_{\phi 2}$ $t_{\phi 1} \neq t_{\phi 2}$	$\Gamma\sqrt{\left(\frac{1}{t_{\phi 1}}+\frac{1}{t_{\phi 2}}\right)^{-1}}$
	$t_{\phi 1} = t_{\phi 2}$ $t_{\phi 1} \neq t_{\phi 2}$	$\Gamma\sqrt{\left(\frac{\pi^2}{8t_{\phi 1}}+\frac{1}{t_{\phi 2}}\right)^{-1}}$
	$\tau_1 = \tau_2 = \tau$ $\tau_1 \neq \tau_2;\ \tau = \tau_{\min}$	$\Gamma\sqrt{2\tau}$

Таблица 7.4.4

Форма напряжения	Предельно допустимая величина $U_{\text{п. п. д}}$
Треугольная (симметричная)	$2\sqrt{2}U_{\text{з.д}}$
Треугольная, несимметричная (пилообразная)	$2\sqrt{2}U_{\text{з.д}}\left(\dfrac{f^n}{f_{\text{п}}^n + f_{\text{п}}\, t_{\text{ф}}/(2t_{\text{ф}})^n}\right)^{1/a}$
Трапецеидальная гребенчатая	$2\sqrt{2}\,U_{\text{з.д}}\left(\dfrac{f^n(2t_{\text{ф}})^{1-n}}{f_{\text{п}}}\right)^{1/a}$

тельность фронтов $t_{\text{ф}}$, длительность вершины $t_{\text{в}}$) находятся из упомянутого выше равенства мощностей решением трансцендентного уравнения относительно одного из этих параметров.

Для определения экстремальных параметров напряжений типовых форм из условия ограничения действующего значения тока через конденсатор используется равенство между предельно допустимой величиной этого тока и его зависимостью от параметров воздействующего напряжения (см. § 5.2).

В табл. 7.4.2 приведены расчетные соотношения для определения экстремальных значений одного из параметров воздействующего напряжения типовых форм.

Для конденсаторов ряда конструкций предельно допустимое значение полного размаха напряжения или длительности фронта должно определяться также из условия ограничения амплитуды импульсного тока на допустимом уровне (см. § 6.1). В табл. 7.4.3 даны расчетные формулы для конденсаторов с металлизированными обкладками.

Кроме рассмотренных выше факторов, которые в случае несинусоидальных напряжений типовых форм в большей степени, чем при синусоидальной форме напряжения, ограничивающих предельно допустимые параметры напряжения, последние, как и при синусоидальной форме, должны определяться также из условий (7.1.3) и (7.1.4).

Полагая, что скорость старения конденсаторов под действием ЧР зависит только от их интенсивности, можно найти приближенную связь между предельно допустимым размахом напряжения на конденсаторе при типовой форме напряжения и предельно допустимым действующим значением напряжения в непрерывном режиме. Так как мгновенное напряжение типовых форм представляет собой чередующиеся участки постоянного напряжения, изменяющиеся по линейному или косинусоидальному закону (см. рис. 5.1.2), то, исходя из данных § 2.4, 6.2 и [В.4—В.7], можно получить, что мощности частичных разрядов при синусоидальном и несинусоидальном напряжениях будут в первом приближении одинаковы или будут равны ресурсы конденсаторов, если напряжения и частоты связаны так, как это показано в табл. 7.4.4.

Здесь f — частота напряжения синусоидальной формы, для которой известно предельно допустимое по мощности частичных разрядов действующее значение напряжения синусоидальной формы $U_{\text{з.д}}$; $f_{\text{п}}$ — частота повторения напряжения типовой формы. Значения показателей a и n в табл. 7.4.4 приведены в табл. 6.2.2 (§ 6.2).

Связь предельно допустимого размаха трапецеидального и гребенчатого напряжений с величиной $U_{\text{з.д}}$ получена из предположения, что частичные разряды имеют место только на участках кривой напряжения, где $\dfrac{du}{dt} \neq 0$, и усреднения мощности частичных разрядов на периоде повторения напряжения [В.12] (см. § 6.2).

Необходимый запас по кратковременной электрической прочности конденсаторов при типовых формах несинусоидального напряжения так же, как и при синусоидальном напряжении, обеспечивается выполнением условия (7.1.4), в котором значение $U_{\text{п.д}}$ при типовых формах напряжения в первом приближении может быть принято равным амплитуде синусоидального напряжения, частота которого равна частоте повторения напряжения типовой формы ($f = f_{\text{п}}$), т. е. значению $\sqrt{2}\,U_{\text{ч.д}}$.

Пример 1. Необходимо определить предельно допустимый в непрерывном простом режиме работы полный размах симметричного трапецеидального напряжения с косинусоидальными фронтами длительностью $t_{\text{ф}} = 100 \cdot 10^{-6}$ с при $f_{\text{п}} = 400$ Гц для конденсатора К75-10-250В-10 мкФ при естественном воздушном охлаждении $T_{\text{о max}} = 40$°С, если требуемый $\tau_{\text{у}} = 10^4$ ч.

По данным примера 2 § 7.2, предельно допустимая мощность тепловыделения в указанных условиях составляет 2,5 Вт. При этой мощности средняя температура активной части секции конденсатора будет: $T_{\text{с}} = 40 + 2{,}5 \cdot 13 = 72$°С. Частота $f_{\text{с}}$, на которой необходимо определять tgδ конденсатора при напряжении заданной формы и параметров, составляет

$$f_{\text{с}} = \sqrt{\frac{400}{2 \cdot 10^{-4}}} \approx 1{,}4 \text{ кГц}.$$

Согласно справочным данным, тангенс угла потерь конденсатора на этой частоте при $T = 70$°С равен $0{,}35 \cdot 10^{-2}$. Тогда пре-

Форма напряжения	Расчетное соотношение
Треугольная симметричная	$\left[\left(\frac{U_{\text{п.п.р1}}}{2\sqrt{2}}\right)^{a''_{\text{р1}}}(f_{\text{п.р1}})^n\frac{t_{\text{р1}}}{T_{\text{ц}}}+\left(\frac{U_{\text{п.п.р2}}}{2\sqrt{2}}\right)^{a''_{\text{р2}}}(f_{\text{п.р2}})^n\frac{t_{\text{р2}}}{T_{\text{ц}}}\right]\tau''_{\gamma}=(U)^{a}f^{n}\tau'_{\gamma}$
Треугольная несимметричная (пилообразная)	$\left[\left(\frac{U_{\text{п.п.р1}}}{2\sqrt{2}}\right)^{a''_{\text{р1}}}(f_{\text{п.р1}})^n\frac{t_{\text{р1}}}{T_{\text{ц}}}+\left(\frac{U_{\text{п.п.р2}}}{2\sqrt{2}}\right)^{a''_{\text{р2}}}(f_{\text{п.р2}})^n\frac{t_{\text{р2}}}{T_{\text{ц}}}\right]\tau''_{\gamma}=(U)^{a'}f^{n}\cdot\tau'_{\gamma}$
Трапецеидальная, гребенчатая	$\left[\left(\frac{U_{\text{п.п.р1}}}{2\sqrt{2}}\right)^{a''_{\text{р1}}}\left(f^n_{\text{п.р1}}+\frac{f_{\text{п.р1}}t_{\phi}}{(2t_{\phi})^n}\right)\frac{t_{\text{р1}}}{T_{\text{ц}}}+\left(\frac{U_{\text{п.п.р2}}}{2\sqrt{2}}\right)^{a''_{\text{р2}}}\times\left(f^n_{\text{п.р2}}+\frac{f_{\text{п.р2}}t_{\phi}}{(2t_{\phi})^n}\right)\frac{t_{\text{р2}}}{T_{\text{ц}}}\right]\tau''_{\gamma}=(U)^{a'}f^{n}\tau'_{\gamma}$

дельно допустимый полный размах напряжения из условия ограничения мощности тепловыделения использованием формулы табл. 7.4.1 для напряжения заданной формы составит

$$U_{\text{п.п.д1}}=\sqrt{2{,}5/1{,}5\cdot400\cdot10^{-6}\cdot0{,}35\times}\rightarrow$$

$$\rightarrow\overline{\times10^{-2}\lg(1{,}8/400\cdot10^{-4})}=270\ \text{В}.$$

Предельно допустимое действующее значение тока согласно данным примера 2 § 7.2 равно $I_{\text{д}}=19{,}4$ А. При таком токе по соответствующей формуле из табл. 7.4.2 находим

$$U_{\text{п.пд2}}=\frac{2\cdot19{,}4}{\pi\cdot10^{-5}}\sqrt{\frac{10^{-4}}{400}}=615\ \text{В}.$$

Уточнение $I_{\text{д}}$ не производим, так как $U_{\text{п.п.д2}}>U_{\text{п.п.д1}}$.

Предельно допустимая по запасу кратковременной электрической прочности амплитуда напряжения для конденсаторов этой конструкции

$$U_{m\text{д}}=1{,}2\sqrt{2}\cdot U_{\text{н}}\approx425\text{В};$$
$$U_{\text{п.п.д4}}=850\text{В}.$$

Предельно допустимый полный размах напряжения по условию импульсного тепловыделения согласно формулам табл. 7.4.3 для заданной формы напряжения составит $U_{\text{п.п.д5}}=9\cdot10^{5}\cdot0{,}03\cdot100\cdot10^{-6}=270$ В.

Значение предельно допустимого размаха напряжения на конденсаторе по допустимой мощности частичных разрядов для конденсатора такой конструкции, рассчитанное по формуле табл. 7.4.4, равно $U_{\text{п.п.д3}}=600$ В.

Таким образом, окончательно в качестве предельно допустимого значения полного размаха напряжения для конденсатора К75-10-250В-10 мкФ в указанных условиях принимается $U_{\text{п.п}}=270$ В как минимальное из всех полученных, т. е. в данном случае факторами, ограничивающими полный размах напряжения, являются интегральное и импульсное локальное тепловыделения.

Определение предельно допустимых параметров несинусоидального напряжения типовых форм в сложных непрерывных режимах осуществляется аналогично тому, как это делалось в случае синусоидальной формы напряжения (см. § 7.2). Для этого, например, при циклическом характере изменения параметров в соответствии с рекомендациями § 6.1 предварительно находятся предельно допустимые мощность тепловыделения и действующее значение тока. Далее эти значения подставляются в формулы табл. 7.4.1 и 7.4.2 для соответствующей формы напряжения. Кроме этих соотношений для конденсаторов с металлизированными обкладками используется соответствующая формула табл. 7.4.3, поскольку для них предельно допустимая амплитуда импульсного тока зависит только от типономинала конденсатора и энергетической длительности импульса тока (см. § 6.1).

Кроме факторов, связанных с тепловыделением, при определении экстремальных параметров напряжения типовой формы в непрерывном режиме работы с циклическим изменением параметров воздействующего на конденсатор напряжения должны учитываться равенства в соотношениях (7.1.3) и (7.1.4).

Используя принятые в § 7.2 и в данном параграфе допущения в отношении мощности и суммарной энергии частичных разрядов, предельно допустимый размах на-

пряжения типовой формы при непрерывном режиме работы с циклическим изменением параметров $U_{\text{п.п}}$ и $f_{\text{п}}$ может быть приближенно определен из равенств, приведенных в табл. 7.4.5. Здесь U — действующее значение синусоидального напряжения с частотой f, при которой гамма-процентный ресурс конденсаторов в случае старения под действием ЧР равен τ'_{γ}.

Все величины, входящие в приведенные формулы, за исключением той, которую нужно определить, должны быть известны (заданы). Смысл величин в приведенных формулах тот же, что и в формуле (7.2.11).

Если частота повторения напряжения типовой формы на интервалах t_{p1} и t_{p2} одна и та же, то в формулы табл. 7.4.5 следует подставить $f_{\text{п.p1}} = f_{\text{п.p2}} = f_{\text{п}}$. Значения a''_{p1}, a''_{p2} и a' берутся одинаковыми, если одинаков характер частичных разрядов, определяемый отношением напряжений $U_{\text{п.п}}$, U к номинальному напряжению (см. § 6.2), и различными, если характер частичных разрядов в базовом и расчетном режимах разный.

Предельно допустимая амплитуда напряжения типовой формы в первом приближении может быть принята равной предельно допустимой амплитуде синусоидального напряжения, частота которого равна $1/2t_{\text{ф min}}$, где $t_{\text{ф min}}$ — наименьшая длительность фронта напряжения.

При непрерывном сложном режиме работы, когда один из параметров меняется не по циклическому, а по более сложному закону, определение предельно допустимых параметров напряжения целесообразно осуществлять с помощью ЭВМ.

В заключение необходимо подчеркнуть, что поскольку при несинусоидальном напряжении тепловыделение в конденсаторах существенно выше, чем при синусоидальном, то в большинстве практических случаев ограничение на допустимые параметры напряжения накладывают тепловые режимы конденсаторов.

В приложении 6 в качестве примера приведены графические зависимости для предельно допустимого полного размаха напряжения трапецеидальной формы для конденсаторов типа К71-4 и К72-11 при работе в непрерывных простых режимах.

§ 7.5. Предельно допустимые параметры несинусоидального напряжения типовых форм в прерывистых режимах нагружения

Особенностью прерывистых режимов нагружения конденсаторов является то, что в этих режимах потери энергии происходят не непрерывно, а с определенными, иногда довольно значительными паузами, где мощность тепловыделения равна нулю. Во время пауз отсутствуют также частичные разряды.

Это обуславливает возможность эксплуатации конденсаторов при более высоких значениях напряжений, частот и меньших длительностях фронтов. Предварительно находятся предельно допустимые для заданного режима работы и условий охлаждения мощность тепловыделения и действующее значение тока. Далее определяются параметры напряжения согласно формулам табл. 7.4.1.—7.4.3.

Для определения экстремальных параметров напряжения по условию ограничения мощности ЧР, учитывая сугубо ориентировочный характер всех расчетов, связанных с учетом этой мощности, можно использовать соотношения табл. 7.4.5, полагая в них $U_{\text{п.п,p1}}$ (или $U_{\text{п.п.p2}}$) равным нулю. При этом величина τ''_{γ} уже будет не ресурс, а гамма-процентный срок службы, тогда как гамма-процентный ресурс конденсатора (как и в случае синусоидальной формы напряжения в прерывистом режиме работы) будет равен $\tau''_{\gamma}\frac{t_{\text{р}}}{T_{\text{ц}}}$.

Если в формулы табл. 7.4.5, используемые в случае прерывистых режимов работы, вместо τ''_{γ} подставлять ресурс (т. е. суммарную наработку под нагрузкой), то из них нужно исключить множитель $t_{\text{р}}/T_{\text{ц}}$.

Пример 1. Необходимо определить предельно допустимый полный размах напряжения симметричной треугольной формы с частотой $f_{\text{п}} = 10^3$ Гц для конденсатора К75-10-250В-10 мкФ при остальных условиях примера 1 § 6.1.

Согласно результатам расчетов в примере 1 § 6.1 $P_{\text{д}} = 18$ Вт и $I_{\text{д}} = 21$ А. Используя формулу табл. 7.4.1, находим

$$U_{\text{п.п1}} = \sqrt{\frac{18}{0{,}54\cdot 10^{-3}\cdot 10\cdot 10^{-6}\cdot 0{,}6\cdot 10^{-2}}} = 745 \text{ В}.$$

По формуле табл. 7.4.2 имеем

$$U_{\text{п.п.2}} = \frac{21}{2\cdot 10^{-5}\cdot 10^{3}} = 1050 \text{ В}.$$

Так как начальные частичные разряды в конденсаторах такой конструкции возникают при напряжении выше номинального (см. § 2.4, 6.2), то для приближенных расчетов принимаем $U_{\text{н.чр}} = 1{,}5\ U_{\text{н}}$ при $f = 50$ Гц. Полагая для простоты $n = 1$ (это приводит к занижению допустимого значения $U_{\text{п.п}}$) и $a'' = a' = 6$ по формуле табл. 7.4.5, соответствующей напряжению заданной формы, находим

$$U_{\text{п.п.p1}} = U_{\text{п.п.3}} = 1{,}5\cdot 250\cdot 2\sqrt{2}\times \sqrt[6]{\frac{50\cdot 10^{4}}{10^{3}\cdot 10^{4}}} \approx 642 \text{ В}.$$

Значение $U_{mд}$ согласно данным § 6.2 для конденсаторов этого типа составляет $1{,}2\cdot\sqrt{2}U_{\text{н}} = 425$ В. При напряжении заданной формы предельно допустимый полный размах напряжения заданной формы $U_{\text{п.пч}} = 2U_{mд} = 850$ В.

Предельно допустимый полный размах напряжения, лимитируемый по условию

ограничения энергии импульсного тепловыделения, не определяем, так как ток через конденсатор при симметричной треугольной форме напряжения не имеет импульсного характера.

Таким образом, в качестве предельно допустимого полного размаха напряжения в заданных условиях принимается $U_{\text{п.п.д}} = U_{\text{п.п.э}} = 642$ В, т. е. в данном случае фактором, ограничивающим предельно допустимое рабочее напряжение, является мощность частичных разрядов. При этом срок службы 90% конденсаторов в указанном режиме ориентировочно составит $\tau_{\text{ус}} = 10^4 \cdot \frac{10}{2} = 5 \cdot 10^4$ ч.

Пример 2. При условиях примера 1 § 6.1 необходимо определить предельно допустимую частоту напряжения гребенчатой формы с косинусоидальной формой фронтов одинаковой длительности, если $t_\phi = 100 \cdot 10^{-6}$ с, $U_{\text{п.п}} = 200$ В, $U_m = 200$ В.

Средняя частота для напряжения данной формы согласно табл. 5.3.2 составляет $f_c = \frac{0{,}3}{t_\phi} = \frac{0{,}3}{10^{-4}} = 3$ кГц. При такой частоте и средней температуре $T_c = 80°C$ (см. пример 3 § 7.3) тангенс угла потерь конденсатора согласно справочным данным равен $0{,}4 \cdot 10^{-2}$.

Из формулы табл. 7.4.1 для напряжения гребенчатой формы находим

$$f'_{\text{п1}} = \frac{18}{1{,}1 \cdot 200^2 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}4 \cdot 10^{-2}} = 10300 \text{ Гц}.$$

Из формулы табл. 7.4.2 определяем

$$f_{\text{п2}} = \frac{4 \cdot 21^2 \cdot 10^{-4}}{2(10^{-5})^2 \cdot 200^2} = 4450 \text{ Гц}.$$

Тепловыделение в конденсаторе при $f_{\text{п}} = f'_{\text{п2}}$ составляет

$$P \approx 18 \cdot \frac{4450}{10\,300} = 7{,}8 \text{ Вт}.$$

Так как это значение существенно меньше $P_{\text{д}} = 18$ Вт, то уточняем предельно допустимое действующее значение тока. Средняя температура корпуса конденсатора

$$T_{\text{к}} = T_{0\,\max} + PR_{\text{т.и}} \frac{t_{\text{р}}}{T_{\text{ц}}} =$$

$$= 40 + 7{,}8 \cdot 5 \frac{2}{10} = 48°C;$$

$$I_{\text{д}} = 12 \sqrt{\frac{(105-48)[1-\exp(-10/1{,}5)]}{(105-85)[1-\exp(-2/1{,}5)]}} =$$

$$= 23{,}3 \text{ А}.$$

Поскольку при определении $f''_{\text{п2}}$ частота станет больше чем $f'_{\text{п2}}$, что приведет к увеличению P и снижению $I_{\text{д}}$, для ускорения итерационного процесса принимаем значение $I_{\text{д}} = 22{,}5$ А, при котором $f^{\text{II}}_{\text{п2}} = 5\,100$ Гц. При этой частоте $P \approx 18 \frac{5\,100}{10\,300} = 8{,}9$ Вт и $T_{\text{к}} = 50°C$, а $I_{\text{д}} \approx 23$ А. Если $I_{\text{д}} = 23$ А, величина $f^{\text{III}}_{\text{п2}} = 5\,350$ Гц. Окончательно определяем $I_{\text{д}} = 22{,}7$ А и $f^{\text{IV}}_{\text{п2}} = 5250$ Гц.

Из полученных двух значений частоты повторения ($f^{\text{I}}_{\text{п1}} = 10\,300$ Гц и $f^{\text{IV}}_{\text{п2}}$) в качестве предельно допустимой принимаем $f_{\text{п}} = f^{\text{IV}}_{\text{п2}} = 5250$ Гц (меньшее из двух значений), поскольку при большей частоте локальное тепловыделение в контактных узлах конденсатора будет недопустимо большим. Таким образом, в данном случае фактором, ограничивающим частоту повторения напряжения, является локальное тепловыделение, связанное с действующим значением тока на периоде повторения.

§ 7.6. Предельно допустимые значения и частота несинусоидального напряжения сложной формы в непрерывных и прерывистых режимах нагружения

Особенность определения предельно допустимых значений и частоты несинусоидального напряжения сложной формы обусловлена неявными связями мощности тепловыделения, действующего значения тока и мощности частичных разрядов с параметрами такого вида напряжений (см. § 2.4, 5.2, 5.3). И в этом случае предварительно для конденсатора на основании рекомендаций § 6.1 для заданного режима работы находятся предельно допустимая мощность тепловыделения, действующее значение тока, амплитуда импульсного тока.

Далее задача состоит в том, чтобы определить предельно допустимое значение напряжения (при заданной форме и частоте повторения) или же частоту (при заданных значении и форме напряжения).

Если напряжение (или ток) конденсатора представлены в виде относительного спектра (см. § 5.1), то указанные задачи могут быть решены следующим образом.

Зная частотную зависимость tgδ конденсатора, по формулам § 5.3, присвоив основной гармонике тока или напряжения некоторое значение и определив по относительному спектру значения напряжений остальных гармоник, находим мощность тепловыделения, соответствующую этому спектру.

Затем определяется предельно допустимое действующее значение напряжения первой гармоники $U_{1\text{д}}$:

$$U''_1 = U'_1 \sqrt{P_{\text{д}}/P'}, \qquad (7.6.1)$$

где U'_1 — присвоенное действующее значение напряжения первой гармоники; P' — мощность тепловыделения, соответствующая абсолютному спектру при $U_1 = U'_1$; $P_{\text{д}}$ — предельно допустимая мощность тепловыделения, рассчитанная для конденсатора по условиям его режима работы и охлаждения (см. § 6.1).

Зная U_1'', по относительному спектру рассчитывают предельно допустимые напряжения высших гармоник. Для конденсатора со значительной температурно-частотной зависимостью фактора потерь ($C \cdot \mathrm{tg}\delta$) при определении P' по формулам § 5.3 необходимо учитывать эту зависимость, рассчитывая среднюю температуру внутри конденсатора по формулам § 5.5.

Для определения предельно допустимого напряжения по действующему значению тока поступают следующим образом. Задаются некоторые значения напряжения первой гармоники U_1' и по заданному относительному спектру находят напряжения высших гармоник $U_к'$. По значениям напряжений определяют действующие значения гармоник токов ($I_к' = U_к' \cdot k \cdot 2\pi f_1 C$) и полного тока

$$I' = \sqrt{\sum_{k=1}^{k_{max}} (I_к')^2}.$$

Далее находится отношение $I'/I_д$, где $I_д$ — предельно допустимое для данного конденсатора и заданного режима работы и условий охлаждения действующее значение тока.

В соответствии с этим отношением рассчитывается предельно допустимое значение напряжения первой гармоники

$$U_1'' = U_1' \frac{I_д}{I'}, \qquad (7.6.2)$$

а по относительному спектру — напряжения высших гармоник.

Чтобы определить предельно допустимую частоту повторения несинусоидального напряжения сложной формы, которое задано в этом случае абсолютным спектром и номерами гармоник k, поступают аналогичным образом. Задавшись некоторой частотой f_1', находят P' (см. § 5.3), и по формуле

$$f_1'' = f_1' \frac{P_д}{P'} \qquad (7.6.3)$$

определяют промежуточное значение f_1'', для которого затем находится значение P'' (согласно значениям $f_к''$). Так поступают до окончания итерационного процесса. Эта корректировка обязательна для конденсаторов с сильной частотной зависимостью $\mathrm{tg}\delta$. Подобным образом получается предельно допустимое значение частоты с использованием предельно допустимого действующего значения тока:

$$f_1''' = f_1' \frac{I_д}{I'}. \qquad (7.6.4)$$

Пример 1. Для конденсатора К75-10-250В-10 мкФ необходимо определить предельно допустимое значение напряжения, если относительный спектр ($k=1$, 3,5) такой: $U_1^* = 1$; $U_3^* = 0{,}33$; $U_5^* = 0{,}2$. Частота первой гармоники $f_1 = 10^3$ Гц. Остальные условия те же, что и в примере 1 § 6.1.

Согласно расчетам примера 1 § 6.1, предельно допустимая мощность тепловыделения и действующее значение тока составляют 18 Вт и 21 А. По частотной зависимости $\mathrm{tg}\delta$ для этого типа конденсаторов значения $\mathrm{tg}\delta$ на частотах $1 \cdot 10^3$, $3 \cdot 10^3$ и $5 \cdot 10^3$ Гц соответственно составляют 0,003; 0,004; 0,006. Приняв $U_1' = 100$ В (действующее значение), находим по (5.3.3)

$$P' = 10^{-5} \cdot 2\pi \cdot 10^3 \cdot 10^4 \cdot 10^{-3} (1 \cdot 3 + $$

$$+ 0{,}33^2 \cdot 4 \cdot 3 + 0{,}2^2 \cdot 6 \cdot 5) = 2{,}82 \text{ Вт}.$$

По формуле (7.6.1) получаем

$$U_1'' = 100 \sqrt{\frac{18}{2{,}82}} = 250 \text{ В}. \text{ Тогда } U_3'' = $$

$$= 0{,}33 \cdot 250 = 82 \text{ В}; \quad U_5'' = 0{,}2 \cdot 250 = 50 \text{ В}.$$

По формуле (5.2.13) при $U_1' = 100$ В определяем действующее значение тока, протекающего через конденсатор:

$$I' = \sqrt{(2\pi 10 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3)^2 \cdot 10^4 (1 + } \rightarrow$$

$$\rightarrow \overline{+ 0{,}33^2 \cdot 3^2 + 0{,}2^2 \cdot 5^2)} = 10{,}9 \text{ А}.$$

Тогда по формуле (7.6.2) значение $U_1'' = $

$$= 10^2 \cdot \frac{21}{10{,}9} = 192 \text{ В}.$$

Окончательно в качестве предельно допустимого значения напряжения первой гармоники принимаем 192 В как меньшее из найденных по двум условиям.

Пример 2. Необходимо рассчитать предельно допустимую частоту первой гармоники напряжения для конденсатора К75-10-250В-10 мкФ, если значения гармоник напряжения такие: $U_1 = 100$, $U_3 = 33$, $U_5 = 20$ В. Остальные условия те же, что и в примере 1 § 6.1.

Задаемся значением $f_1' = 10^3$ Гц. Тогда мощность тепловыделения в конденсаторе (см. пример 1) составит $P' = 2{,}32$ Вт. По формуле (7.6.3) находим $f_1'' = \frac{18}{2{,}32} = $ $= 7760$ Гц. По значению f_1'' определяем $P'' = 4{,}9$ Вт. Следующее значение $f_1''' = $ $= \frac{18}{4{,}9} = 3700$ Гц и $P''' = 4{,}4$ Вт. Дальнейшие итерации приводят к окончательному значению $f_1 = 4000$ Гц. При $f_1' = 10^3$ действующее значение тока через конденсатор составит $I' = 11$ А. Тогда согласно формуле (7.6.4) находим $f_1''' = \frac{21}{11} = $ $= 1{,}9$ кГц. Окончательно в качестве предельно допустимой частоты принимаем значение $f_1 = 1{,}9$ кГц как минимальное, полученное из двух условий.

В тех случаях, когда несинусоидальное напряжение задано во временной области относительными значениями дискрет U_j^*

и расчет мощности потерь осуществляется на ЭВМ, определение предельно допустимого значения напряжения (в данном случае — полного размаха или амплитуды) или частоты производится аналогично изложенному выше. В формулы (7.6.1)—(7.6.4) при этом подставляются значения P' и I', определяемые методами, изложенными в § 5.2, 5.3.

Кроме того, предельно допустимое значение полного размаха напряжения $U_{\text{п.п.д}}$ для конденсаторов с металлизированными обкладками находится также из соотношения

$$U_{\text{п.п.д}} = 10^6 \Gamma U_{\text{в.п}} \left(\frac{\sqrt{\Delta t_j}}{U^*_{j+1} - U^*_j} \right)_{\min}, \quad (7.6.5)$$

где $U^*_j = \dfrac{U_j}{U_{\text{п.п}}}$, $\Delta t_j = t_{j+1} - t_j$ (см. рис. 5.3.2); Γ — коэффициент, определяемый из табл. 6.1.7.

Значение $U_{\text{п.п}}$ при нахождении U^*_j выбирается произвольным, например, равным 1,0 В.

Для вычисления $U_{\text{п.п.д}}$ по условию (7.6.5) на периоде $T_{\text{н}}$ находится участок, где производная от напряжения максимальна (этому участку соответствует наибольший мгновенный ток).

Самым сложным является определение предельно допустимого значения несинусоидального напряжения произвольной формы по условию ограничения мощности ЧР. Кривая мгновенного напряжения может содержать участки с большими производными напряжения по времени и его перепадами, достаточными для возникновения ЧР чаще, чем два раза за период повторения напряжения. Ориентировочно предельно допустимое значение несинусоидального напряжения может быть оценено путем его замены синусоидальным напряжением, амплитуда которого равна половине полного размаха несинусоидального напряжения. Частота эквивалентного по мощности частичных разрядов синусоидального напряжения принимается равной частоте несинусоидального, если в кривой последнего отсутствуют провалы напряжения, способные вызвать дополнительные вспышки ЧР на периоде повторения [В.6] (см. § 2.4, 4.6). Если такие провалы имеются, то частота эквивалентного напряжения приближенно принимается равной $f_{\text{п}} \cdot \dfrac{3m}{2}$, где m — число таких провалов на периоде повторения несинусоидального напряжения.

§ 7.7. Предельно допустимые параметры напряжения конденсаторов в емкостных накопителях энергии

В емкостных накопителях энергии используются специальные конденсаторы. Характерные режимы работы импульсных конденсаторов рассмотрены в § 5.1. Это режим одиночных импульсов и режим, при котором импульсное устройство генерирует пачки импульсов.

Конденсаторы емкостных накопителей для получения максимальных удельных энергий работают при экстремальных напряженностях электрического поля, достигающих 150—200 МВ/м. Это обуславливает интенсивное старение под действием ЧР и соответственно малые ресурсы (см. § 2.4, 4.6).

Импульсные конденсаторы разрабатывают для одного конкретного режима работы и характера разряда (апериодического, колебательного полного, неполного и с изменением полярности напряжения — см. § 5.1).

Однако на практике часто возникает необходимость использования импульсных конденсаторов при условиях, отличных от тех, для которых они были разработаны.

Таким образом, задача состоит в определении экстремальных параметров напряжения и режима нагружения исходя из обеспечения определенного гамма-процентного ресурса конденсаторов, например, сохранения его номинального значения.

В тех случаях, когда импульсное напряжение накопительного конденсатора может быть сведено к одной из типовых форм несинусоидального напряжения (см. § 5.1), указанная задача решается на основании данных § 7.4, 7.5. Если форма напряжения сложная, то, используя его кусочно-линейную аппроксимацию, можно найти предельно допустимые параметры, руководствуясь сведениями § 7.6.

Часто, однако, требуется приближенная оценка предельно допустимых параметров импульсного напряжения (или тока) конденсатора, поскольку обычно впоследствии производится экспериментальная проверка расчетных данных [7.2, 7.3].

Приближенное определение предельно допустимых параметров производится на основе тех же критериев, которые рассматривались в предыдущих параграфах. Для снижения возникающих при этом погрешностей целесообразно использовать как данные номинального режима работы, так и такие, пока еще не нормируемые параметры конденсаторов, как тепловое сопротивление, температурно-частотные зависимости $\operatorname{tg}\delta$ или последовательное активное сопротивление схем замещения диэлектрика и металлических частей конструкции (параметры схемы замещения конденсатора и диэлектрика см. в § 4.3) и др.

Очевидно, что достоверность данных, получаемых расчетным путем, падает по мере увеличения разницы между номинальным режимом и режимом, для которого определяются предельно допустимые параметры.

Для импульсных конденсаторов, работающих при низких и инфранизких частотах повторения (менее одного герца), главными факторами, которые необходимо учитывать при определении предельно допустимых параметров напряжения, в частности его значения и характера разряда, являются частичные разряды и импульсные токи.

Предельно допустимые значения амплитуды импульсного тока при различной его длительности определяются по формулам (6.1.14)—(6.1.16), исходя из ограничения импульсного тепловыделения и импульса механических сил.

Зная эту амплитуду и зависимость ее от параметров напряжения (см. § 5.2), можно определить один из таких параметров, если известны остальные. В случае использования формулы (6.1.16) для вычисления предельно допустимой амплитуды разрядного тока при апериодическом характере разряда конденсатора, у которого номинальным является колебательный режим разряда, в качестве $t_{\text{и.н}}$ принимается половина периода колебаний при разряде, т. е. $1/2\ f_{\text{р}}$, где $f_{\text{р}}$ — частота колебаний разрядного тока в номинальном режиме.

Второй лимитирующий фактор — частичные разряды, которые учитываются на основании зависимости их мощности и суммарной энергии от характера и параметров импульсного разряда (см. § 2.4, 4.6, [В.4—В.8]).

При апериодическом характере разряда можно приближенно оценить предельно допустимые параметры импульсного напряжения по формулам § 7.4, 7.5, используя для этой цели типовые напряжения пилообразной или трапецеидальной форм. Так как длительность нарастания напряжения (передний фронт) у накопительных конденсаторов обычно существенно больше длительности спада (заднего фронта), то расчетная формула для приближенного определения экстремальных параметров напряжения принимает вид

$$(U_{\text{п.п1}})^{a_1}\left[\left(\frac{1}{2t_{\text{з1}}}\right)^n \frac{t_{\text{з1}}}{T_{\text{п1}}} + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{1}{2t_{\text{р1}}}\right)^n \frac{t_{\text{р1}}}{T_{\text{п1}}}\right] \tau_\gamma' =$$

$$= (U_{\text{п.п2}})^{a_2}\left[\left(\frac{1}{2t_{\text{з2}}}\right)^n \frac{t_{\text{з2}}}{T_{\text{п2}}} + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{1}{2t_{\text{р2}}}\right)^n \frac{t_{\text{р2}}}{T_{\text{п2}}}\right] \tau_\gamma'', \qquad (7.7.1)$$

где $U_{\text{п.п1}}$, $U_{\text{п.п2}}$ — полный размах напряжения на конденсаторе в первом и во втором режимах; $t_{\text{з1}}$; $t_{\text{з2}}$; $t_{\text{р1}}$; $t_{\text{р2}}$; $T_{\text{п1}}$; $T_{\text{п2}}$ — соответственно продолжительности интервалов зарядки, разряда конденсатора и период повторения импульсов; τ_γ', τ_γ'' — гамма-процентные ресурсы конденсаторов в этих двух режимах.

Подставляя в (7.7.1) параметры номинального режима, можно определить один из параметров режима, отличного от номинального, задаваясь значениями других параметров.

При колебательном разряде оценка предельно допустимых параметров напряжения существенно затруднена сложным характером влияния частоты колебаний тока при разряде, декремента колебаний, периода повторения на тепловыделение и мощность частичных разрядов в конденсаторах и соответственно на их ресурс (см. § 2.4, 4.6, 5.3, 6.2, а также [В.4—В.7, 7.5, 7.6]).

Оценку предельно допустимой амплитуды разрядного тока исходя из импульсной механической стойкости приближенно можно осуществить по формуле, вытекающей из (6.1.16):

$$I_m = I_{m\text{н}}\sqrt{t_{\text{и.н}} 2f_{\text{р}}}, \qquad (7.7.2)$$

где $f_{\text{р}}$ — частота колебаний при разряде в режиме, отличном от номинального; $t_{\text{и.н}}$ — время разряда в номинальном режиме, если характер разряда в нем апериодический; $t_{\text{и.н}} = \dfrac{1}{2f_{\text{р.н}}}$, если характер разряда в номинальном режиме колебательный; $I_{m\text{н}}$ — амплитуда импульса тока в номинальном режиме.

Если импульсный конденсатор имеет плавкие предохранители или металлизированные обкладки, то при определении предельно допустимой амплитуды импульсного тока необходимо исходить также из условия (6.1.5), ограничивающего импульсное тепловыделение в слабых звеньях конструкции конденсаторов. Для этого нужно знать характеристику I^2t для предохранителя, а также коэффициент Г и энергетическую длительность колебательного затухающего импульсного тока.

Наиболее сложной задачей является определение параметров импульсного режима работы с колебательным характером разряда исходя из допустимой мощности частичных разрядов.

Приближенно она решается путем замены затухающего импульсного синусоидальным напряжением с амплитудой U_m, равной напряжению, до которого был заряжен конденсатор, эквивалентным по энергии частичным разрядам [В.7]. Число полупериодов $K_э$ такого синусоидального напряжения зависит от декремента и числа полупериодов затухающего импульсного напряжения P, на которых амплитуда колебаний больше напряжения зажигания $U_з$ частичных разрядов (см. § 2.4):

$$K_э = \frac{1 - \Delta^{-ap/2}}{1 - \Delta^{-a/2}}. \qquad (7.7.3)$$

Здесь a — показатель, значения которого приводятся в § 2.4, 6.2;

$$P = \frac{4f_{\text{р}}L}{r}\ln\frac{U_m}{U_з};$$

L, r — индуктивность и последовательное активное сопротивление контура разряда; Δ, $f_{\text{р}}$ — декремент и частота колебаний тока при разряде [см. формулу (2.4.21)].

Тогда ориентировочные значения допустимых параметров импульсного напряжения при колебательном характере разряда могут быть определены из соотношения (7.7.1), полагая в нем $t_{\text{р2}} \approx K_э/2f_{\text{р2}}$. При

больших декрементах ($\Delta > 1{,}5$) приближенно можно принимать $K_0 = 1$ [В.7].

При повышенных частотах повторения импульсного напряжения экстремальные параметры режима работы необходимо определять не только из условий ограничения амплитуды импульсного тока и мощности частичных разрядов, но также исходя из обеспечения допустимого теплового режима работы.

В этом случае затруднения в нахождении этих параметров обусловлены более громоздкими выражениями для расчета тепловыделения в конденсаторах и действующего значения тока (см. § 5.2, 5.3, а также [В.11, 5.8—5.11]). Поэтому для ориентировочных расчетов целесообразно использовать приближенные методы расчета таких нагрузок (см. § 5.2, 5.3).

Более точно расчеты допустимых параметров напряжения осуществляются на ЭВМ согласно рекомендациям § 7.6.

§ 7.8. Особенности расчета предельно допустимых параметров напряжения, содержащего постоянную составляющую

В предыдущих параграфах рассматривалось определение предельно допустимых параметров переменного напряжения, не содержащего постоянную составляющую или при незначительной ее величине.

Если конденсаторы предназначаются для работы при напряжении со значительной постоянной составляющей, возникают новые задачи в случае определения параметров напряжения, обусловленные как наличием этой составляющей, так и характеристиками конденсаторов, применяемых в таких случаях.

При этом обычно требуется определение предельно допустимых параметров переменной составляющей напряжения и режима работы, если задана постоянная составляющая, а в некоторых случаях — определение постоянной составляющей при заданной переменной.

Согласно классификации электрических напряжений (рис. 5.1.1) напряжение является однополярным или пульсирующим, если постоянная составляющая больше отрицательного пикового значения переменной составляющей. В противном случае напряжение — двухполярное.

Независимо от вида напряжения предельно допустимые параметры напряжения переменной составляющей и режима работы должны определяться в соответствии с рекомендациями предыдущих параграфов, поскольку от этих параметров зависит мощность интегрального и локального тепловыделения, а также превышение температуры элементов конструкции конденсатора.

Особенностью определения предельно допустимого действующего значения тока и его амплитуды при импульсном характере и соответственно предельно допустимых параметров напряжения для конденсаторов с оксидным диэлектриком является то, что токи должны быть ограничены не только по условиям интегрального и локального тепловыделения, но и с учетом допустимой интенсивности протекания процессов электрохимического разрушения конденсаторов.

Значения этих токов находят экспериментально для различных конструкций конденсаторов (некоторые из них указаны в табл. 6.1.8).

Зная значения этих токов, а также предельно допустимые мощности тепловыделения, в соответствии с рекомендациями § 7.2.-7.7 определяют параметры предельно допустимого рабочего напряжения. Особенностью определения параметров напряжения для конденсаторов с оксидным диэлектриком является то, что их емкость и $\mathrm{tg}\delta$ сильно зависят от частоты (см. § 4.1) и времени. Поэтому при нахождении этих параметров необходимо учитывать данные зависимости [7.7].

Так, при определении предельно допустимых параметров несинусоидальных напряжений типовых форм в расчетные формулы следует подставлять значения $\mathrm{tg}\delta$ и емкости конденсаторов на средней частоте (см. табл. 5.3.2, § 5.3). Для вычисления этих параметров по допустимой амплитуде импульсного тока значение емкости конденсаторов в формулах табл. 5.2.1 должно браться по зависимости $C(\omega)$ (см. § 4.1) на частоте $f = 1/2t_{\phi\,\min}$.

При сложной несинусоидальной форме переменной составляющей напряжения его предельно допустимое значение и частота для конденсаторов с оксидным диэлектриком находятся согласно рекомендациям § 7.6 с использованием для этой цели параметров схемы замещения всего конденсатора в виде $R_i C_i$-цепочек, включенных параллельно (см. рис. 4.3.7).

Предельно допустимые параметры переменной составляющей напряжения для полярных и неполярных конденсаторов с оксидным диэлектриком определяются также из соотношений:

$$U_{\text{п}}^{\pm} = U_{\text{н}}\,\kappa_{\text{н}} - U_0;\ U'_{\text{п.п}} = \frac{U_{\text{п}}^{+}}{\left(U_{\text{п}}^{+}\right)^{*}}, \qquad (7.8.1)$$

где $U_{\text{п}}^{\pm}$ — положительное пиковое значение переменной составляющей напряжения (см. § 5.1); U_0 — постоянная составляющая напряжения; $U_{\text{н}}$ — номинальное напряжение конденсатора; $\kappa_{\text{н}}$ — коэффициент допустимого превышения номинального напряжения (его значение приводится в ТУ. Обычно $\kappa_{\text{н}} = 1{,}0$ для длительных непрерывных режимов и $\kappa_{\text{н}} = 1{,}10 \div 1{,}15$ — для кратковременных перенапряжений); $(U_{\text{п}}^{-})^{*}$ — относительное пиковое положительное значение переменной составляющей (см. § 5.1), определяемое по форме этой составляющей при единичном значении $U_{\text{п.п}}$.

Для полярных конденсаторов с оксидным диэлектриком предельно допустимое отрицательное пиковое значение и полный размах переменной составляющей напряжения определяются также из соотношений

$$\left|U_{\text{п}}^{-}\right| = U_0;\ U_{\text{п.п}} = \frac{U_{\text{п}}^{-}}{\left(U_{\text{п}}^{-}\right)^{*}}, \qquad (7.8.2)$$

где $(U_{\text{п}}^{-})^*$ — относительное пиковое отрицательное значение переменной составляющей, определяемое по форме этой составляющей при единичном значении $U_{\text{п.п}}$.

Предельно допустимая отрицательная амплитуда переменной составляющей напряжения и соответственно $U_{\text{п.п}}$ в случае неполярных конденсаторов с оксидным диэлектриком находится по соотношению (7.8.1) с заменой $U_{\text{п}}^{+}$ на $U_{\text{п}}^{-}$.

В качестве предельно допустимого полного размаха напряжения принимается минимальное из двух значений $U_{\text{п.п}}$, определяемых по (7.8.1) и (7.8.2).

Для синусоидальной переменной составляющей величина $U_{\text{п.п}}$ из условия (7.8.1) равна $2(U_{\text{нк}}-U_0)$, а из условия (7.8.2) — $2U_0$.

Особенностью определения предельно допустимых параметров переменной составляющей пульсирующего напряжения для конденсаторов с органическим диэлектриком при учете характеристик частичных разрядов является зависимость их интенсивности не только от параметров переменной составляющей, но и от значения постоянной составляющей напряжения [В.7] (см. § 2.4, 4.6, 6.2).

Напряженность начальных ЧР при постоянном напряжении выше, чем при переменном, однако зависимость мощности ЧР от напряжения при этом более сильная, чем при переменном напряжении.

Если постоянная составляющая напряжения недостаточна для возникновения начальных частичных разрядов, то предельно допустимые параметры переменной составляющей напряжения находятся в соответствии с рекомендациями предыдущих параграфов, по характеристикам ЧР конденсаторов на переменном напряжении с учетом изменения этих характеристик под влиянием постоянной составляющей напряжения (см. § 6.2).

При пульсирующем напряжении рекомендуется [В.1] выполнять условия

$$U_{\text{п.п}} \leqslant (U_{\text{п.п}})_{\min}; \qquad (7.8.3)$$

$$U_{\text{п}}^{+} + U_0 \leqslant U_{0\text{ЧР}}, \qquad (7.8.4)$$

где $(U_{\text{п.п}})_{\min}$ — минимальное значение полного размаха переменного напряжения, при котором возникают начальные частичные разряды; $U_{0\text{ЧР}}$ — постоянное напряжение, при котором возникают начальные частичные разряды.

Значение $U_{0\text{ЧР}}$ различно для конденсаторов низкого и высокого напряжения и к тому же оно сильно зависит от температуры (см. § 2.4, 6.2).

При незначительной переменной составляющей напряжения и постоянной составляющей ниже $U_{0\text{ЧР}}$ предельно допустимое значение постоянной составляющей определяется исходя из зависимости ресурса конденсаторов от температуры (см. § 4.6).

В ТУ на конденсаторы приводятся данные о значениях допустимого постоянного напряжения в зависимости от температуры.

Пример. Для конденсатора типа К50-22-25В-6800 мкФ необходимо определить предельно допустимое значение полного размаха напряжения пилообразной формы с линейными фронтами при $t_{\Phi} = 10^{-4}$ с при следующих условиях.

Режим нагружения простой, непрерывный, охлаждение естественное воздушное при $T_{\text{о max}} = 50°\text{C}$, частота повторения $f_{\text{п}} = 10^3$ Гц. Необходимый 90%-ный гамма-ресурс $\tau_{\gamma} = 10^4$ ч. Конденсатор работает в составе батареи $C_{\text{б}} = 68\,000$ мкФ с плотной упаковкой конденсаторов. Постоянная составляющая напряжения $U_0 = 24$ В.

Полное максимальное тепловое сопротивление конденсатора определяем приближенно на основании данных, приведенных в § 4.4. Площадь поверхности охлаждения данного конденсатора равна $S_0 \approx \pi ДН = \pi \cdot 3 \cdot 8 \approx 75$ см^2. По рис. 4.4.4 при $\Theta_{\text{к}} = 10$ К находим значение наружного теплового сопротивления одиночного конденсатора $R_{\text{т.н}} \approx 10$ К/Вт.

В соответствии с данными § 4.4 значение $R_{\text{т.в/п}} \approx 0{,}6\ R_{\text{т.н}} = 6$ К/Вт.

При плотной упаковке цилиндрических конденсаторов в батарее наружное тепловое сопротивление центральных единиц увеличивается примерно в полтора-два раза [В.12] (см. § 4.4 табл. 4.4.4). Поэтому полное максимальное тепловое сопротивление конденсатора принимается равным $R_{\text{тт}} = 6 + 2 \cdot 10 = 26$ К/Вт.

Согласно данным табл. 6.1.2 для алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов при заданном τ_{γ} значение $T_{\text{тд}} = 65 \div 80°\text{C}$. Приняв $T_{\text{тд}} = 75°\text{C}$, по формуле (6.1.6) находим предельно допустимую мощность тепловыделения:

$$P_{\text{д}} = \frac{75-50}{26} = 0{,}96 \text{ Вт}.$$

По ТУ эти конденсаторы имеют 50%-ный положительный допуск по емкости и значение $\text{tg}\delta = 0{,}27$ в начале эксплуатации, которое может увеличиваться к концу срока наработки не более чем в пять раз.

Приняв в качестве расчетного предельное значение $\text{tg}\delta = 5 \cdot 0{,}27 = 1{,}35$, по формуле из табл. 7.4.1 для пилообразного напряжения найдем

$$U_{\text{п п1}} = \sqrt{0{,}9 \cdot 0{,}73 \cdot 10^3 \cdot 1{,}5 \cdot 6{,}8 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}} \times$$

$$\times \sqrt{1{,}35(10^{-3}/10^{-3} - 10^{-4})^2} \approx 0{,}29 \text{ В}.$$

Предельно допустимая амплитуда напряжения синусоидальной формы, по данным ТУ, на частоте $f = 10^3$ Гц составляет около 0,3 В. С учетом этого действующее значение тока

$$I_д = \frac{0{,}3}{\sqrt{2}} \cdot 2\pi \cdot 10^3 \cdot 6{,}8 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} \approx 9\text{ А}.$$

По формуле из табл. 7.4.2 для пилообразного напряжения имеем

$$U_{п.п2} = \frac{9}{1{,}5 \cdot 6{,}8 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}} \times$$

$$\times \sqrt{\left[10^3 \left(1\ 10^{-4} - \frac{10^3}{1 - 10^3 \cdot 10^{-4}}\right)\right]^{-1}} \approx$$

$$\approx 0{,}28\text{ В}.$$

Предельно допустимую амплитуду импульсного тока для конденсатора определяем приближенно, используя данные табл. 6.1.8:

$$I_{mд} = 0{,}02 \cdot 1{,}5 \cdot 6{,}8 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} \approx 200\text{ А}.$$

Тогда

$$U_{п.п3} = \frac{I_{mд}\, t_ф}{C} = \frac{200 \cdot 10^{-4}}{6{,}8 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}} \approx 2{,}9\text{ В}.$$

Наконец, из соотношения (7.8.1) при $к_н = 1{,}0$ находим $U_п^+ = 1$ В и $U_{п.п4} = 2$ В, а из соотношения (7.8.2) $U_п^- = 24$ В и $U_{п.п5} = 48$ В, так как $(U_п^+)^* = (U_п^-)^* = 0{,}5$.

Окончательно предельно допустимое значение полного размаха напряжения в заданных условиях составит 0,28 В как меньшее из всех рассчитанных.

§ 7.9. Определение экстремальных параметров режимов нагружения конденсаторов

На практике иногда возникает необходимость определения экстремальных значений продолжительности нагружения $t_р$, паузы $t_п$ или периода $T_ц$ при циклических нагрузках или при перегрузке [6.3, 6.4]. Для их определения используются формулы, приведенные в § 6.1.

В таких случаях заданными являются форма и параметры воздействующего напряжения, условия охлаждения конденсаторов, а также один из параметров режима нагружения.

Так, например, если в непрерывном режиме мощность тепловыделения в конденсаторе составляла $P_{р1}$, причем $P_{р1}R_{тт} < T_{mд} - T_{0\,max}$, а $P_{р2}R_{тт} > T_{mд} - T_{0\,max}$, то предельно допустимая продолжительность работы с мощностью $P_{р2} > P_{р1}$ ($P_{р2}$ — мощность тепловыделения в режиме перегрузки) будет равна

$$t_{р2} = \tau_т \ln \frac{(P_{р2} - P_{р1})\, R_{тт}}{P_{р2}R_{тт} - T_{mд} + T_{0\,max}}. \quad (7.9.1)$$

В случае циклического ступенчатого изменения активной мощности на уровнях $P_{р1}$ и $P_{р2}$ (при $P_{р1}R_{тт} < T_{mд} - T_{0\,max} < P_{р2}R_{тт}$) в непрерывном режиме предельно допустимая продолжительность

$$t_{р2} = \tau_т \ln < (P_{р2} - P_{р1})\, R_{тт} \{P_{р2}R_{тт} - (T_{mд} - T_{0\,max})[1 - \exp(-T_ц/\tau_т)] - P_{р1}R_{тт} \exp(-T_ц/\tau_т)\} >, \quad (7.9.2)$$

период циклической нагрузки

$$T_ц = \tau_т \ln \{[T_{mд} - T_{0\,max} - P_{р1}R_{тт}]/[T_{mд} - T_{0\,max} - P_{р2}R_{тт} + (P_{р2} - P_{р1})\, R_{тт} \times \exp(-t_{р2}/\tau_т)]\}. \quad (7.9.3)$$

В простом циклическом прерывистом режиме теплового нагружения при $PR_{тт} > T_{mд} - T_{0\,max}$ и повторно-кратковременном квазистационарном тепловом режиме работы предельно допустимые длительности

$$t_р = \tau_т \ln < PR_{тт} \{PR_{тт} - (T_{mд} - T_{0\,max})[1 - \exp(-T_ц/\tau_т)]\} >; \quad (7.9.4)$$

$$T_ц = \tau_т \ln < (T_{mд} - T_{0\,max}) \{T_{mд} - T_{0\,max} - PR_{тт}[1 - \exp(-T_ц/\tau_т)]\} >. \quad (7.9.5)$$

При стационарном повторно-кратковременном тепловом режиме (см. § 5.1) длительности

$$t_р = \frac{T_{mд} - T_{0\,max}}{PR_{тт}} \cdot T_ц; \quad (7.9.6)$$

$$T_ц = \frac{PR_{тт}}{T_{mд} - T_{0\,max}}\, t_р. \quad (7.9.7)$$

Длительность кратковременного режима, при которой достигается значение $T_{mд}$, если мощность тепловыделения составляет $P(PR_{тт} > T_{mд} - T_{0\,max})$, равна

$$t_р = \tau_т \ln \frac{PR_{тт}}{PR_{тт} - T_{mд} + T_{0\,max}}. \quad (7.9.8)$$

Если ограничение параметров режима нагружения вызвано не интегральным нагревом за счет мощности тепловыделения в конденсаторе, а локальным, обусловленным током конденсатора, то экстремальные параметры режима нагружения находятся по формулам, приведенным в табл. 7.9.1.

Здесь $I_д$ — предельно допустимое действующее значение тока, определяемое с учетом рекомендаций § 6.1 [см. формулы (6.1.12), (6.1.13)]; I — заданное действующее значение тока на интервале нагружения.

Поскольку для определения тока $I_д$ необходимо знать также температуру T_1 и T_2, зависящую от мощности тепловыделения и параметров режима (см. § 6.1), экстремальные параметры режима нагружения (как и предельно допустимые действующие значения тока) должны опреде-

Таблица 7.9.1

Тепловой режим элемента конструкции с локальным тепловыделением	Экстремальные параметры	Номер формулы
Повторно-кратковременный, квазистационарный	$t_{\text{р}} = \tau'_{\text{т}} \ln \dfrac{I^2}{I^2 - I_{\text{д}}^2 \left[1 - \exp\left(-T_{\text{ц}} / \tau'_{\text{т}}\right)\right]}$ $T_{\text{ц}} = \tau'_{\text{т}} \ln \dfrac{I_{\text{д}}^2}{I_{\text{д}}^2 - I^2 \left[1 - \exp\left(-t_{\text{р}} / \tau'_{\text{т}}\right)\right]}$	(1)
Повторно-кратковременный, стационарный	$t_{\text{р}} = \left(\dfrac{I_{\text{д}}}{I}\right)^2 T_{\text{ц}}; \quad T_{\text{ц}} \left(\dfrac{I}{I_{\text{д}}}\right)^2 t_{\text{р}}$	(2)
Кратковременный режим	$t_{\text{р}} = \tau'_{\text{т}} \ln \dfrac{I^2}{I^2 - I_{\text{д}}^2}$	(3)

ляться с учетом этой мощности и параметров прерывистых режимов.

Необходимо также учитывать, что в формулах табл. 7.9.1 величина $\tau'_{\text{т}}$ — это тепловая постоянная времени не всего конденсатора, а только того элемента конструкции, который является лимитирующим по локальному нагреву (см. § 6.1).

Так как по двум лимитирующим факторам (мощность и действующее значение тока) экстремальные значения параметров режима, рассчитанные по вышеприведенным формулам, обычно получаются разными, окончательно принимается то значение, которое является ограничивающим: минимальное — для продолжительности работы $t_{\text{р}}$, максимальное из двух значений — для $T_{\text{ц}}$.

Пример 1. Необходимо определить предельно допустимую продолжительность режима кратковременной перегрузки конденсатора КСК1-0,66-40-2У1 по активной мощности, длительно работающего, если $P_{\text{р1}} = 60$ Вт, при следующих условиях: охлаждение естественное воздушное, $T_{\text{о max}} = +55$°С, $P_{\text{р2}} = 200$ Вт.

Из данных примера 3 § 7.2 максимальное полное тепловое сопротивление этого конденсатора $R_{\text{т}m} = 0{,}4$ К/Вт. В соответствии с формулой (7.9.1)

$$t_{\text{р2}} = 145 \ln \frac{(200 - 60) \cdot 0{,}4}{200 \cdot 0{,}4 - 105 + 55} \approx 120 \text{ мин.}$$

Здесь $\tau_{\text{т}} = 145$ мин согласно данным § 4.4 (табл. 4.4.5).

Пример 2. Та же задача и те же условия, что и в примере 1, но в случае циклического повторения перегрузки при $T_{\text{ц}} = 60$ мин.

Из формулы (7.9.2)

$$t_{\text{р2}} = 145 \ln < (200 - 60) \cdot 0{,}36 / \{200 \cdot 0{,}36 -$$

$$- (105 - 55)[1 - \exp(-60/145)] - 60 \cdot 0{,}36 \times$$

$$\times \exp(-60/145)\} > = 30 \text{ мин.}$$

Пример 3. Необходимо определить минимально допустимую паузу в прерывистом режиме нагружения конденсатора К75-10-250В-10 мкФ при естественном воздушном охлаждении $T_{\text{о max}} = +40$°С, если средняя за $t_{\text{р}} = 120$ с мощность тепловыделения в нем составляет 18 Вт, действующее значение тока $I = 10$ А, $T_{\text{пд}} = 105$°С. Поскольку продолжительность интервала нагружения сопоставима с $\tau_{\text{т}}$ конденсатора, которая равна 30 мин (см. приложение 3), то минимальную допустимую длительность цикла исходя из предельно допустимого нагрева конденсатора определяем по формуле (7.9.5):

$$T_{\text{ц1}} = 30 \ln \frac{105 - 40}{105 - 40 - 18 \cdot 15{,}6 \times} \approx 10 \text{ мин.}$$
$$\times [1 - \exp(-2{,}30)]$$

Тогда минимально допустимая длительность паузы $t_{\text{п1}} = T_{\text{ц1}} - t_{\text{р}} = 600 - 120 = 480$ с.

По формуле (1) табл. 7.9.1 для повторно-кратковременного теплового режима находим

$$T_{\text{ц2}} = 1{,}5 \ln \frac{21^2}{21^2 - 10^2 [1 - \exp(-2 \cdot 1{,}5)]} \approx 165 \text{ с,}$$

где 21 А — значение $I_{\text{д}}$, определенное по формуле (6.1.13) для заданного значения P и режима работы так же, как это выполнено в примере 1 § 6.1.

Здесь при определении $T_{\text{ц2}}$ использовалась тепловая постоянная времени не всего конденсатора, а только зоны локального нагрева (контактные узлы) $\left(\tau'_{\text{т}} \approx 1{,}5 \text{ мин}\right)$.

Окончательно принимаем минимально допустимую паузу, равную 480 с, т. е. в данном случае главный лимитирующий фактор — это мощность интегрального тепловыделения. Для расчета экстремальных параметров режима нагружения конденсаторов в случае, когда лимитирующим фактором становятся ЧР, можно воспользоваться соотношениями предыдущих параграфов, в которых этот фактор учтен.

§ 7.10. Эквивалентирование режимов нагружения конденсаторов

В связи с тем, что для большинства типов конденсаторов в настоящее время некоторые параметры и характеристики конденсаторов, необходимые для определения допустимых напряжений (например, тепловые сопротивления и постоянные времени, частотные зависимости tgδ, допустимые действующие значения тока и др.), не известны, на практике часто приходится определять допустимые параметры различных режимов по данным одного или нескольких режимов, приведенных в ТУ или другой НТД.

При этом обычно принимается, что показатели эксплуатационной надежности конденсаторов в эквивалентном режиме должны быть такими же, как и в режимах, приведенных в НТД.

Для обеспечения эквивалентности режимов нагружения необходимо, чтобы интенсивности термического, электрохимического старения, а также старения под действием ЧР в эквивалентируемых режимах были одинаковыми. Это достигается при условии равенства в двух режимах максимальных внутренних температур или в первом приближении — равенства мощностей интегрального и локального тепловыделения, действующих значений токов, амплитуд воздействующих напряжений, а также суммарных энергий ЧР.

Разумеется, что из всех этих условий выполняется обычно одно, а по другим условиям обеспечивается определенный запас.

Из указанных условий можно найти параметры воздействующего напряжения или параметры режима нагружения в эквивалентном режиме (по мощности тепловыделения, нагрузкам по току и т. д.).

На практике может возникнуть необходимость определения параметров эквивалентного длительного, повторно-кратковременного или кратковременного режимов при синусоидальной или несинусоидальной форме напряжения (типовой или сложной), если в ТУ на конденсатор приведены параметры одного или нескольких перечисленных режимов, причем условия охлаждения могут быть либо одинаковыми, либо разными в заданном режиме и режиме ТУ.

Зная зависимость мощности тепловыделения в конденсаторе, действующего значения тока от параметров напряжения, можно определить эти параметры путем эквивалентирования тепловых режимов.

Пример 1. Задано, что конденсатор допускает работу при номинальном напряжении в прерывистом циклическом режиме с $t_р/T_ц=0{,}2$ и $T_ц=5$ с при синусоидальной форме напряжения во время работы с частотой f. Необходимо найти полный размах $U_{п.п}$ напряжения, эквивалентного по максимальной внутренней температуре, в непрерывном режиме при гребенчатой форме напряжения (рис. 5.1.2, *г*) с частотой повторения $f_п$ и длительностью симметричных фронтов, которые имеют синусоидальную форму $t_ф$, если условия охлаждения одинаковы. Максимальная внутренняя температура конденсатора в режиме ТУ, согласно данным § 5.1, 6.1, равна:

$$T_m=T_{0\,max}+P_1R_{Tm},$$

где $P_1=U_н^2\ 2\pi fC_н\mathrm{tg}\delta(f)$. Максимальная внутренняя температура в длительном режиме

$$T_m=T_{0\,max}+P_2R_{Tm},$$

где $P_2=1{,}1U_{п.п}^2 f_п C_н\mathrm{tg}\delta_c$, согласно данным табл. 5.3.2. Приравнивая значения T_m в этих двух режимах, находим

$$U_{п.п}=U_н\sqrt{\frac{f\mathrm{tg}\delta(f)}{1{,}1\cdot f_п\mathrm{tg}\delta_c}}.$$

Пример 2. Задано, что конденсатор допускает длительную работу при симметричном трапецеидальном напряжении с параметрами $U_{п.п}$, $f_п$, $t_ф$. Фронты напряжения одинаковы по длительности и линейны по форме (рис. 5.1.2, *б*). Необходимо определить параметры эквивалентного по мощности тепловыделения и действующего значения тока длительного режима при синусоидальной форме напряжения в одинаковых условиях охлаждения. Мощность тепловыделения в конденсаторе в обоих режимах, согласно данным § 5.3, равна:

$$P_1=1{,}5U_{п.п}^2 f_п C_н\mathrm{tg}\delta_c\lg\frac{1{,}4}{f_п t_ф};$$

$$P_2=U_2^2\,2\pi fC_н\mathrm{tg}\delta(f).$$

Действующее значение тока, согласно § 5.2, будет

$$I_1=U_{п.п}\sqrt{2}\ C_н\sqrt{f_п/t_ф};\ I_2=U_2 2\pi fC_п.$$

Приравнивая выражения для мощностей и токов и решая систему уравнений, получаем

$$U_2=\frac{1{,}5U_{п.п}\,f_п\,\mathrm{tg}\delta_c}{\sqrt{2}\sqrt{f_п/t_ф}\,\mathrm{tg}\delta(f)}\lg\frac{1{,}4}{f_п t_ф};$$

$$f=\frac{2}{2\pi t_ф\dfrac{\mathrm{tg}\delta_c}{\mathrm{tg}\delta(f)}\lg\dfrac{1{,}4}{f_п t_ф}}.$$

При отсутствии данных о частотной зависимости tgδ приходится исходить из допущения о равенстве tgδ в режиме ТУ и эквивалентном. Насколько справедливо это допущение, можно судить по значениям f и f_c, а также по данным § 4.1, учитывая при этом тип и конструкцию конденсатора.

В ТУ может быть задан не один, а несколько допустимых режимов работы, например, зависимость допустимого рабочего напряжения от частоты. В этом случае режимы, в которых мощность тепловыделения и действующее значение тока достигают предельных значений, могут не совпадать, т. е. для определения параметров эквивалентных режимов необходимо предварительно определить наибольшие значе-

ния P и I в режимах ТУ, рассчитав их значения по соответствующим формулам и учитывая характеристики $\mathrm{tg}\delta(f)$ и $C(f)$.

На практике может возникнуть также задача эквивалентирования режимов, если различны не только электрические режимы, но и условия охлаждения. В этих случаях необходимо учитывать зависимость допустимой мощности тепловыделения в конденсаторах от температуры охлаждающей среды (см. § 6.1) и зависимость тепловых сопротивлений конденсаторов от скорости охлаждающего воздуха, а также от их взаимного расположения в батарее (см. § 4.4).

Пример 3. Задано, что конденсатор допускает длительную работу при синусоидальном напряжении U_1, частоте f и естественном воздушном охлаждении. Необходимо определить допустимое действующее значение напряжения в длительном режиме при той же частоте f, с принудительным воздушным охлаждением. Максимальная температура охлаждающего воздуха одна и та же в обоих случаях.

Согласно (6.1.5) $T_m = T_{\text{o max}} + PR_{\text{т}m}$. Так как по условию

$$T_{\text{o max1}} = T_{\text{o max2}},\ T_{m1} = T_{m2},$$

то $P_1 R_{\text{т}m1} = P_2 R_{\text{т}m2}$,

откуда $U_2 = U_1 \sqrt{\dfrac{R_{\text{т}m2}}{R_{\text{т}m1}}}$, где $R_{\text{т}m2}$ и $R_{\text{т}m1}$ — полные максимальные тепловые сопротивления конденсаторов в случае принудительного и естественного воздушного охлаждения (см. § 4.4).

В примере 3 для определения допустимого рабочего напряжения при принудительном воздушном охлаждении конденсатора достаточно знать относительное значение полного максимального сопротивления $R^*_{\text{т}m}$ (рис. 4.4.8). Если бы в примере 3 при принудительном воздушном охлаждении температура охлаждающего воздуха отличалась от заданной в ТУ, то допустимая величина рабочего напряжения составила бы:

$$U_2 = U_1 \sqrt{\frac{R_{\text{т}m1}}{R_{\text{т}m2}} - \frac{T_{\text{o max2}} - T_{\text{o max1}}}{U_1 \cdot 2\pi f C_{\text{н}} R_{\text{т}m2} \mathrm{tg}\delta}},$$

где $T_{\text{o max1}}$, $T_{\text{o max2}}$ — максимальные температуры охлаждающего воздуха по ТУ и в заданных условиях, т. е. в этом случае уже необходимо знать абсолютные значения тепловых сопротивлений конденсаторов и величину их $\mathrm{tg}\delta$.

Глава 8. Выбор конденсаторов

Основной задачей, которую часто приходится решать разработчикам аппаратуры и устройств, является выбор оптимального конденсатора, т. е. определение его типа и номинальных параметров, который будет не только работоспособен в заданных режимах и условиях эксплуатации, но и обладать наилучшими удельными параметрами. Таким образом, при выборе конденсаторов должны учитываться их электрические, тепловые нагрузки, механические и другие факторы, влияющие на их работоспособность (см. шестую главу), а также удельные параметры (см. § 1.7).

Применение выбранного конденсатора в заданных условиях согласуется с головными организациями в установленном порядке.

Наибольшие возможности у разработчиков аппаратуры в выборе конденсаторов возникают при учете электрических и тепловых режимов работы, поскольку в таком случае возможны широкое варьирование схем соединения конденсаторов с одинаковыми или различными номинальными параметрами, применение конденсаторов разных типов, а в некоторых случаях — изменение условий охлаждения.

В связи с этим основной целью данной главы является рассмотрение выбора конденсаторов с позиций учета электрического и теплового режимов.

§ 8.1. Общие принципы выбора конденсаторов

Исходными данными при выборе типа и номинала параметров конденсатора, а также схемы их соединения в батарее являются:

— область применения и назначение конденсатора;

— значение и допустимые пределы отклонения необходимой емкости, ее частотная, температурная и временная стабильность (в отдельных случаях может быть задано значение требуемой реактивной мощности);

— необходимые показатели надежности конденсаторов в эксплуатации (ресурс, срок службы — см. § 4.8);

— характеристики электрического режима нагружения (форма и параметры воздействующих на конденсатор напряжения и тока в нормальном рабочем режиме и режиме перегрузок, в том числе аварийных — см. § 5.1);

— допустимые абсорбция и сопротивление изоляции;

— климатические условия эксплуатации (диапазон рабочих температур, влажности, минимальное и максимальное давление — см. § 1.2, 6.3);

— условия охлаждения (расположение конденсаторов, вид охлаждения — естественное или принудительное, скорость охлаждающего воздуха);

— механические нагрузки (вибрации, удары, ускорения — см. § 1.2, 6.3);

— особые условия эксплуатации (например, наличие и характер агрессивных паров, токопроводящей пыли, радиационные воздействия — см. § 6.3, эксплуатация в составе батарей и т. д.);

— технико-экономические критерии выбора.

В ряде случаев при выборе типа конденсаторов приходится учитывать и характер их официальной приемки.

Общие принципы выбора конденсаторов сводятся к тому, чтобы в заданных условиях эксплуатации, понимая при этом весь комплекс вышеперечисленных условий, была обеспечена их работоспособность.

На практике часто встречаются случаи, когда этому условию могут удовлетворять несколько типов конденсаторов и более того — конденсаторы одного и того же типа, но с различными номинальными параметрами. Поэтому естественным завершением выбора является определение оптимального по массе, объему, стоимости или комплексному технико-экономическому критерию типа и номинальных параметров конденсатора.

К основным документам, в которых приводятся сведения, необходимые для выбора конденсаторов, относятся: ГОСТы (см. § 1.5), ТУ, каталоги, справочники, специальные перечни, нормали и другая НТД.

Предварительный выбор конденсаторов. Основываясь на исходных данных, а также на знаниях общих свойств и номинальных параметров конденсаторов различных типов, производится предварительный выбор конденсаторов, т. е. определение подходящих для данных условий эксплуатации типов конденсаторов и их номинальных параметров.

На этом этапе полезно использовать таблицы сводных данных по параметрам конденсаторов. В них должны быть отражены основные сведения о номинальной емкости, напряжении, диапазоне рабочих температур и некоторые другие характеристики. Основой предварительного выбора конденсаторов служит область их применения и назначение, которые часто однозначно предопределяют тип необходимого конденсатора.

Здесь, однако, надо заметить, что в некоторых случаях в определенных условиях с успехом могут использоваться конденсаторы, разработанные для других режимов и назначений. Например, импульсный конденсатор может применяться в качестве фильтрового, а конденсатор, разработанный для режима с синусоидальной формой напряжения,— в импульсном режиме, и т. д. Это обусловлено дискретностью рядов номинальных параметров, а также другими причинами.

Предварительный выбор типов и номинальных данных конденсаторов значительно облегчается при наличии зависимостей удельных параметров различных типов и номинальных данных от частоты, длительности фронтов и т. д. (см. § 4.7), а также при использовании графических зависимостей предельно допустимых величин рабочих напряжений от частоты и других параметров [В.11, В.12] (см. также приложение 6).

При выборе типа конденсатора необходимо сразу учесть заданные климатические условия эксплуатации, механические нагрузки и другие факторы, которые позволят сократить число возможных вариантов.

Предварительный выбор существенно облегчается, если разработчик аппаратуры хорошо ориентируется в разнообразии конструктивных особенностей конденсаторов и в областях их применения (рис. 8.1.1.). В табл. 8.1.1—8.1.3 приводятся обобщенные данные, помогающие подобрать соответствующий тип конденсатора (ОСТ 11 074.011—79.)

Кроме вышеуказанных характерных областей использования конденсаторов, существуют особенности применения конденсаторов при низких рабочих напряжениях (см. § 6.2), которые также необходимо учитывать.

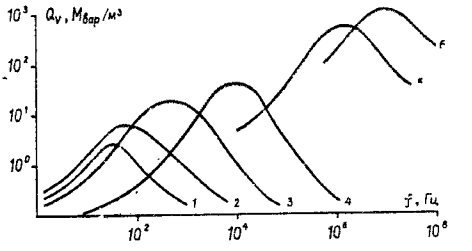


Рис. 8.1.1. Частотные зависимости наибольших значений удельной реактивной мощности конденсаторов бумажных (*1*), бумажно-пленочных (*2*), пленочных с неполярным диэлектриком и металлизированными (*3*) и фольговыми (*4*) обкладками, керамических, стеклянных, стеклокерамических (*5*), вакуумных (*6*)

Оценка допустимости применения конденсаторов. Применение конденсаторов в заданных условиях допустимо, если выполняется неравенство:

$$\tau_\gamma \geqslant \tau'_\gamma, \qquad (8.1.1)$$

где τ'_γ — заданный (требуемый) гамма-процентный ресурс или срок службы конденсаторов; τ_γ — фактический гамма-процентный ресурс или срок службы конденсаторов этого типа в заданных условиях.

Это условие будет выполнено, если выполняются соотношения (7.1.1) —(7.1.6), т. е. если в заданном режиме интегральное и локальное тепловыделение, максимальная температура, мощность частичных разрядов и амплитуда напряжения не превосходят значений, предельно допустимых для заданного ресурса [8.1—8.6].

Из этого следует два способа оценки допустимости режима работы конденсаторов. Первый заключается в том, что для заданных условий эксплуатации на основе рекомендаций из седьмой главы находятся предельно допустимые параметры напряжения и режима нагружения, которые затем сопоставляются с заданными значениями. Если предельно допустимые параметры напряжения и режима нагружения превосходят заданные, то применение конденсатора в заданных условиях эксплуатации возможно.

Второй способ оценки допустимости режима работы конденсатора — комбинированный. В этом случае сопоставляются предельно допустимые мощности тепловыделения, максимальная температура вну-

Таблица 8.1.1

Характерные особенности эксплуатации и требований к конденсаторам	Особенности конструкции конденсаторов, применение которых целесообразно	Сокращенное обозначение типов конденсаторов
	Для работы при пульсирующем напряжении	
Низкий уровень пульсации с низкой и средней частотой	С оксидным диэлектриком (серии)	К50, К52, К53
Низкий уровень пульсации со средней и высокой частотой	С оксидным, бумажным, лавсановым, керамическим диэлектриком	К10, К15, К40, К41, К42, К50, К73
Высокий уровень пульсации со средней и высокой частотой	Бумажно-пленочные, с пленочным неполярным (полипропиленовым, полистироловым, фторопластовым) и слабополярным (поликарбонатным) диэлектриком	К72, К70, К71, К75, К77, К78
Высокий уровень пульсации с низкой частотой	С бумажным и лавсановым диэлектриком	К40, К41, К42, К73
Эксплуатация при повышенных температурах	С оксидным, лавсановым, поликарбонатным, фторопластовым и слюдобумажным диэлектриком	К53, К72, К73, К74, К77
	Для работы при синусоидальном напряжении	
Кратковременная работа на низких частотах	Неполярные с оксидным диэлектриком, металлобумажные, лавсановые с металлизированными обкладками	К41, К50, К73
Длительная работа на низких частотах, большие сроки службы	Бумажные и бумажно-пленочные с жидкой пропиткой и фольговыми обкладками	К40, К41, К75, КС, КСК
Работа на средних частотах	Бумажно-пленочные и пленочные с металлизированными и фольговыми обкладками	ЭСК, ЭС, ЭСВ, ЭСВК, К71, К72, К73, К74, К75, К77, К78
Работа на высоких частотах	Керамические, стеклянные, стеклокерамические, слюдяные, вакуумные, газонаполненные	К10, К15, К21, К22, К23, К31
Работа в прерывистых режимах на средних частотах	Бумажно-пленочные, пленочные	К71, К72, К73, К75, К77, К78
	Для работы при несинусоидальном напряжении	
Работа на низких частотах, наличие перенапряжений, высокие требования к надежности	С бумажно-лавсановым, бумажно-полипропиленовым диэлектриком и металлизированными обкладками	К75, ПСК
Работа при средних и высоких частотах	С бумажно-полипропиленовым, бумажно-лавсановым, а также с неполярным пленочным диэлектриком и металлизированными и фольговыми обкладками	ПСК, К70, К71, К72, К73, К74, К75, К77, К78
Работа при больших амплитудах импульсных токов на инфранизких частотах	С бумажным и бумажно-пленочным диэлектриком и полярной и неполярной пропиткой и оксидным диэлектриком	К40, К41, К50, К75
То же, но на низких и средних частотах	С неполярным пленочным и бумажно-пленочным диэлектриком	К71, К72, К75, К78

три конденсатора, действующее значение тока и амплитуда тока через конденсатор с такими же величинами в заданном режиме. Характеристики частичных разрядов и кратковременной электрической прочности конденсаторов здесь учитываются так же, как и в первом способе, т. е. путем расчета предельно допустимых параметров воздействующего напряжения согласно рекомендациям из седьмой главы.

При этом предельно допустимые мощность тепловыделения в конденсаторе, внутренняя температура, действующее значение и амплитуда тока находятся для требуемого гамма-процентного ресурса конденсаторов при заданных режиме нагружения и условиях охлаждения в соответствии с рекомендациями § 6.1.

Если указанные величины в заданных условиях эксплуатации не превосходят пре-

Таблица 8.1.2

Типы конденсаторов широкого назначения	Сокращенное обозначение	Номинальная емкость $C_н$	Номинальное напряжение $U_н$, В	$10^3 \cdot tg\delta$	Частота (Гц), на которой измеряется $tg\delta$	Диапазон рабочих температур		Основные особенности	Область преимущественного применения
						$-T_{o\,min}$	$+T_{o\,max}$		
С твердым неорганическим диэлектриком									
Керамические: I типа низковольтные	К10	1—15·10³ пФ	100—1600	1—3	(0,3—1,5)·10⁶	60	155	Малые потери	Термокомпенсация, емкостная связь, колебательные контуры
II типа, группа Н по ТКЕ, низковольтные	К10	10² пФ-2,2 мкФ	25—500	25—50	1·10³	60	200	Большие потери	Шунтирующие, блокирующие, развязывающие и фильтрующие цепи, емкостная связь на низкой частоте
III типа, группа Н по ТКЕ, низковольтные	К10	4,7·10³пФ— 6,8мкФ	3— 100	100	10³	60	85	То же	Та же
I типа высоковольтные	К15	1—15·10³ пФ	10³—3·10⁴	1,3	(0,3; 1,5)·10⁶	60	155	Малые потери	Емкостная связь, мощные колебательные контуры, импульсные устройства
II типа высоковольтные	К15	68—40·10³ пФ	1.6·10³— 10·10³	35	10³	60	85	Большие потери	Шунтирующие, блокирующие, развязывающие и фильтрующие цепи, емкостная связь на низкой частоте
Стеклянные низковольтные	К21	2,2—5,6·10³ пФ	35—500	2(3, 5)	(0,3; 1)·10⁶	60	200 (300)	Малые потери	Блокирующие, шунтирующие цепи, колебательные контуры, емкостная связь
Стеклокерамические (кроме группы Н)	К22	9—3,9·10³ пФ	25—50	2(3, 5)	(0,3; 1,5)·10⁶	60	155 (200)	То же	Та же
Стеклокерамические, группа Н	К22	6,8—15·10³ пФ	12—250	10	10³	60	100	Большие потери	Та же, что для керамических конденсаторов II и III типов

Продолжение табл. 8.1.2

Типы конденсаторов широкого назначения	Сокращенное обозначение	Номинальная емкость $C_н$	Номинальное напряжение $U_н$, В	$10^3 \cdot \mathrm{tg}\delta$	Частота (Гц), на которой измеряется tgδ	Диапазон рабочих температур		Основные особенности	Область преимущественного применения
						$-T_{0min}$	$+T_{0max}$		
Стеклоэмалевые низковольтные	К23	9,1—10^3 пФ	300; 500	1(2)	$(0,5; 1,5) \cdot 10^3$	60	100	Малые потери	Та же, что и для К21
Стеклоэмалевые высоковольтные	К23	22—100 пФ	3500	1,5	10^6	60	100	То же	Блокирующие цепи, емкостная связь, импульсные устройства
Слюдяные низковольтные малой мощности	К31	47 пФ—0,2 мкФ	100—1600	1—2	10^6	60	155 (500)	» »	Блокирующие, шунтирующие и фильтрующие цепи высокой частоты, емкостная связь в линиях задержки, образцовые емкости
Слюдяные высоковольтные	К31	47 пФ—0,15 мкФ	1800—2500	1,0	$(0,3; 1,0) \cdot 10^6$	60	70(85)	Малые потери	Та же, что и для К23
С твердым органическим диэлектриком									
Бумажные низковольтные	К40	47 пФ—1 мкФ	50—1600	10(15)	50; 10^3	60	125	Большие потери	Блокирующие, буферные, шунтирующие, фильтрующие цепи, емкостная связь
Бумажные высоковольтные	К41	$1 \cdot 10^3$ пФ—5 мкФ	$2 \cdot 10^3$—$4 \cdot 10^4$	10	50; 10^3	60	70(125)	Большие потери, низкая стоимость	Та же, что и для К15
Металлобумажные низковольтные	К42	$4,7 \cdot 10^3$ пФ—30 мкФ	10—1600	15	50; 10^3	60	100	То же	Развязывающие, блокирующие цепи, фильтры питания
Полистирольные фольговые низковольтные	К70	1,0 пФ—0,5 мкФ	35—500	1,0(0,5; 1,5)	10^3; $(0,3; 1) \cdot 10^6$	40 (60)	70(85)	Малые потери	Контуры высокой добротности, интегрирующие устройства, образцовые емкости, времязадающие цепи

Продолжение табл. 8.1.2

Типы конденсаторов широкого назначения	Сокращенное обозначение	Номинальная емкость $C_н$	Номинальное напряжение $U_н$, В	$10^3 \cdot tg\delta$	Частота (Гц), на которой измеряется $tg\delta$	Диапазон рабочих температур: $-T_{omin}$	Диапазон рабочих температур: $+T_{omax}$	Основные особенности	Область преимущественного применения
С оксидным диэлектриком									
Полистирольные фольговые высоковольтные	К70	120, 150, 390 нФ	$(10—18) \cdot 10^3$	1; 1,5	10^3; 10^6	40	60	То же	Высоковольтные фильтрующие блокирующие среднечастотные и высокочастотные цепи, импульсные устройства
Полистирольные и из пленки САМП, низковольтные, металлизированные	К71	22 пФ—20 мкФ	35(10)—1600	1,0—1,5	10^3; 10^6	60	60(85)	» »	Та же, что и для низковольтных конденсаторов серии К70
Фторопластовые низковольтные: фольговые металлизированные	К72 К72	470 пФ—4,7мкФ $1 \cdot 10^4$ пФ—2,2 мкФ	125—1600 200—500	0,5—1,0 1,5	10^3 10^3	60 60	200(70) 200(70)	» »	В тех же цепях, что и полистирольные, но при повышенных температурах и более жестких требованиях к электрическим конденсаторам
Лавсановые низковольтные: металлизированные фольговые	К73	$1 \cdot 10^3$ пФ—100 мкФ 470 пФ—1 мкФ	35—1600 50—630	10; 15 8—10	50; 10^3 50; 10^3	60 60	125 125(100)	Большие потери	Та же, что и для К42
Комбинированные: низковольтные высоковольтные	К75	$1 \cdot 10^3$пФ—100 мкФ $1 \cdot 10^3$пФ—2 мкФ	250—1600 $3 \cdot 10^3$—$30 \cdot 10^3$	8—15 8—10	10^3 50; 10^3	60 60	100(125) 85	Умеренные потери, высокая надежность	Цепи переменного и пульсирующего напряжения низкой и средней частоты
Лакопленочные низковольтные	К76	0,47—22 мкФ	35—250	20—50	50; 10^3	60	85	Большие потери	Фильтрующие, блокирующие, развязывающие цепи низкой частоты

Продолжение табл. 8.1.2

Типы конденсаторов широкого назначения	Сокращенное обозначение	Номинальная емкость $C_н$	Номинальное напряжение $U_н$, В	$10^3 \cdot \mathrm{tg}\delta$	Частота (Гц), на которой измеряется tgδ	Диапазон рабочих температур		Основные особенности	Область преимущественного применения
						$-T_{o\,min}$	$+T_{o\,max}$		
Поликарбонатные металлизированные низковольтные	К77	0,01—22 мкФ	63—400	2,5—6,0	10^3	60	125	Умеренные потери, высокая стабильность емкости	Цепи переменного, пульсирующего и постоянного напряжения устройств низкой и средней частоты
Полипропиленовые металлизированные низковольтные	К78	0,01—68 мкФ	100—1000 В	1,5—2,0	50; 10^3	60	70(85)	Малые потери, высокие удельные параметры	Та же
С оксидным диэлектриком									
Алюминиевые	К50	0,5—10^5 мкФ	3—500	100—350	50	60	85	Большие потери и токи утечки	Фильтрующие цепи питания, шунтирующие и развязывающие цепи, емкостные накопители
Танталовые	К51	1—470 мкФ	6,3—160	150—500	50	60	100	Малые габариты и токи утечки	Та же, что и для К50, но при повышенных требованиях к параметрам конденсаторов
Танталовые с объемно-пористым анодом	К52	0,1—100 мкФ	6—200	50—300	50	60	200	Малые токи утечки, высокая рабочая температура	Та же, что и для К51 при применении конденсаторов в транзисторных устройствах
Оксидно-полупроводниковые	К53	0,022—100 мкФ	2—125	60—300	50	80	85(125)	Малые токи утечки, высокая рабочая температура	Та же

Примечание. В скобках показаны значения tgδ для некоторых типов конденсаторов.

Таблица 8.1.3

Типы импульсных конденсаторов	Сокращенное обозначение	Номинальная емкость $C_н$	Номинальное напряжение $U_н$, В	$10^3 \cdot \mathrm{tg}\delta$	Частота (Гц), на которой измеряется tgδ	Диапазон рабочих температур		Основные особенности	Область преимущественного применения по частоте повторения
						$-T_{0min}$	$+T_{0max}$		
Керамические	К15	1—10^3 пФ	$1{,}5 \cdot 10^3$—$3 \cdot 10^4$	1,5÷3,0	$(0{,}3—1{,}5) \cdot 10^6$	60	155	Малые потери	Средние и высокие частоты
Бумажные	К41	10^3—100 мкФ	$2 \cdot 10^3$—$50 \cdot 10^4$	8—10	50; 10^3	60	100 (125)	Большие потери	Низкие и инфранизкие частоты
Металлобумажные	К42	10^4—200 мкФ	300—630	8—10	50	60	60	То же	Та же
Фторопластовые	К72	470—1 мкФ	200—1600 $2 \cdot 10^3$—$3 \cdot 10^4$	1	50; 10^3	60	200	Малые потери	Средние и высокие частоты
Лавсановые фольговые	К74	$5 \cdot 10^3$—1 мкФ	$2{,}5 \cdot 10^3$—10^4	7—10	10^3	60	100	Большие потери	Низкие и инфранизкие частоты
Комбинированные	К75	10^3—100 мкФ	10^3—$5 \cdot 10^4$	8—10	50; 10^3	60	70 (100)	Высокая надежность	Инфранизкие, низкие и средние частоты
Оксидные алюминиевые	К50	250—10^3 мкФ	300—500	120—150	50	40	40(60)	Большие удельные энергии	Инфранизкие частоты

дельно допустимых значений, то применение выбранного конденсатора возможно.

Второй способ оценки допустимости режима работы конденсатора более короткий, чем первый, и его использование предпочтительно, если параметры и характеристики конденсатора, необходимые для его реализации, известны в полном объеме.

При неполной информации о параметрах и характеристиках конденсатора лучше оценивать допустимость режима первым способом, применяя принцип эквивалентирования режимов работы конденсаторов (см. § 7.10).

В случаях, когда при уточнении допустимости режима работы конденсатора возникают существенные запасы по экстремальным параметрам напряжения и режима нагружения, или же по мощности тепловыделения, максимальной температуре, амплитуде и действующему значению тока, значению напряжения, найденному по характеристикам ЧР, необходимо проверить допустимость применения в заданных условиях конденсатора с большим номинальным значением емкости, или меньшим номинальным напряжением. Естественно, что чем меньше запас по этим величинам, тем выше будут фактически удельные параметры конденсатора.

Если установлено, что конденсатор в заданных условиях недопустимо эксплуатировать, то необходимо проверить допустимость применения конденсатора с меньшим значением номинальной емкости, при его же отсутствии — конденсатора с большим номинальным напряжением.

Если ни один из конденсаторов не удовлетворяет данным условиям, необходимо последовательное соединение двух или более конденсаторов с одинаковыми или различными номинальными параметрами. При этом напряжение, воздействующее на каждый единичный конденсатор, уменьшается, в связи с чем их применение становится возможным. Часто для получения необходимой емкости также приходится осуществлять параллельное соединение конденсаторов.

Поскольку расчет предельно допустимых рабочих напряжений приведен в седьмой главе, ниже рассматривается решение задачи выбора путем определения допустимости применения конденсаторов сопоставлением предельно допустимых значений мощности тепловыделения, действующего значения тока с фактическими величинами, имеющими место в заданном режиме.

При выборе конденсатора необходимо учитывать не только напряжение, приложенное к его выводам, но и напряжение, действующее между выводами и корпусом, т. е. допустимое для корпусной изоляции, особенно при высоком напряжении, когда осуществляется последовательное соединение нескольких конденсаторов.

В связи с тем, что такие параметры конденсаторов, как tgδ, $R_{\tau m}$ и другие, определяющие тепловой режим работы, задаются с определенным запасом, учитывающим их разброс, отклонением емкости от номинальной при расчете предельных значений мощности тепловыделения и токовых нагрузок можно пренебречь (за исключением конденсаторов с оксидным диэлектриком).

Однако допуск на емкость следует учитывать, когда заданы предельно допустимые отклонения емкости батареи конденсаторов и при расчете напряжения на единичных конденсаторах с их последовательным соединением.

Так как в процессе эксплуатации на конденсаторы могут воздействовать перенапряжения различной формы, кратности, продолжительности и частоты повторения, то при оценке допустимости применения необходимо учесть этот фактор, используя рекомендации из седьмой главы и данные § 4.6 и 6.2.

Окончательный выбор конденсатора. Может оказаться, что в результате предварительного выбора получится несколько вариантов с разными типами, номиналами и схемами включения конденсаторов. В таком случае необходимо сопоставить данные варианты по массе, габаритам, стоимости или же по комбинированному показателю, учитывающему два или все три из перечисленных факторов.

С этой целью определяются масса, объем и стоимость конденсаторного оборудования для всех выбранных вариантов, из которых окончательно определяется оптимальный по заданному критерию.

На данном этапе выбора разработчики аппаратуры должны также учитывать такие факторы, как технологичность производства аппаратуры с разными вариантами конденсаторов, унификацию по номенклатуре и дефицитность конденсаторов разных типов. Этот учет особенно важен при массовом производстве и при несущественных различиях между вариантами. Например, если технико-экономические показатели вариантов близки, предпочтение следует отдавать тому, при котором производственные затраты на монтаж батареи конденсаторов будут меньше.

§ 8.2. Выбор конденсаторов для работы на синусоидальном напряжении в непрерывном режиме

В этом случае наиболее просто выбор осуществляется с помощью графических зависимостей допустимого рабочего напряжения от частоты, имеющихся в ТУ (см. также приложение 6).

Однако эти зависимости, как правило, приведены только для одной (максимальной из рабочего диапазона) температуры среды, для одиночно расположенного конденсатора при естественном воздушном охлаждении и для длительного режима работы.

К тому же данная зависимость часто приводится как обобщенная либо для всех, либо для нескольких групп номинальных параметров конденсаторов. Поэтому такие графические зависимости обычно служат основой для предварительного выбора конденсатора, который затем уточняется.

Кроме того, иногда возникает задача определения, допустимо ли использование при синусоидальном напряжении конденсаторов, разработанных для применения при одной из типовых форм напряжения (см. § 5.1).

В этих случаях решение задачи выбора конденсатора осуществляется на базе расчетных методов.

С учетом условий обеспечения работоспособности конденсаторов (см. § 6.1, 6.2), в общем случае применение конденсатора допустимо, если выполняются следующие условия:

$$P_д \geqslant P; \qquad (8.2.1)$$

$$I_д \geqslant I; \qquad (8.2.2)$$

$$U_{з.д} \geqslant U; \qquad (8.2.3)$$

$$U_{ч.д} \geqslant U, \qquad (8.2.4)$$

где значения величин $P_д$, $I_д$, $U_{з.д}$, $U_{ч.д}$ те же, что и в соотношениях (7.2.3) и (7.2.4) § 7.2.

Численные значения этих величин находятся так же, как и при определении предельно допустимых напряжений (см. § 7.1), т. е. с учетом данных § 4.6, 6.1, 6.2.

В неравенствах (8.2.1)—(8.2.4) U — действующее значение напряжения на конденсаторе; P — мощность тепловыделения; I — действующее значение тока конденсатора в заданном режиме. Значения I и P рассчитываются по выражениям, приведенным в § 5.2, 5.3 для синусоидального напряжения.

Таким образом, для предварительно выбранных конденсаторов определяются и сопоставляются значения величин, входящих в соотношения (8.2.1)—(8.2.4). Если эти соотношения удовлетворяются, то выбранный конденсатор можно применять в заданных условиях. Но если хотя бы одно из соотношений не удовлетворяется, следует проверить выполнение соотношений для конденсаторов с меньшим номинальным значением емкости или большим значением номинального напряжения и использовать параллельное или последовательное включение конденсаторов.

В тех случаях, когда для конденсаторов отсутствуют параметры и характеристики, необходимые для определения значений величин I, P, U из соотношений (8.2.1)—(8.2.4), их находят приближенно (как это изложено в § 7.10). Тогда значение $U_{з.д}$ может быть принято равным номинальному, если конденсатор разработан для переменного синусоидального напряжения.

Этот способ, хотя и позволяет найти конденсаторы, которые допустимо применять в данном режиме, достаточно трудоемок из-за необходимости проверки условий (8.2.1)—(8.2.4) почти для всех номинальных параметров конденсаторов. Поэтому с целью сокращения объема вычислений целесообразно применение упрощенных способов выбора. Так, в работе [В.12] предлагается сразу выбрать конденсатор, для которого удовлетворяются следующие условия:

$$R_{тт}C_н \leqslant (T_{тд} - T_{0\,max})/P^*; \qquad (8.2.5)$$

$$I_д\,C_н > I^* \sqrt{\frac{T_{тд} - T'_{0max}}{T_{тд} - T_{0\,max}}}; \qquad (8.2.6)$$

$$U_{п.п}\sqrt{2} \geqslant U, \qquad (8.2.7)$$

где $P^* = U^2 2\pi f \operatorname{tg}\delta(f)$ — мощность тепловыделения в конденсаторе емкостью в одну фараду при заданном действующем значении напряжения U и частоте f; $I^* = U \cdot 2\pi f$ — действующее значение тока через конденсатор при этих же условиях; $I_д/C_н$ — удельное предельно допустимое действующее значение тока (А/Ф), определяемое с учетом формул (6.1.12), (6.1.13); $U_{п.п}$ — допустимый по условию ограничения мощности частичных разрядов полный размах напряжения на конденсаторе; $\operatorname{tg}\delta(f)$ — тангенс угла потерь конденсато-

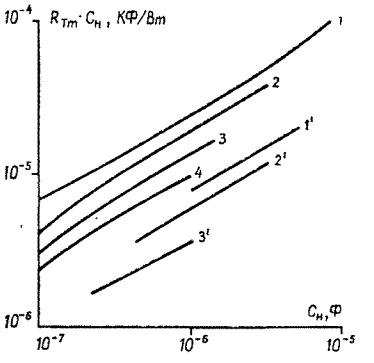


Рис. 8.2.1. Зависимость $R_{тт}C_н$ от номинальной емкости одиночных цилиндрических конденсаторов с металлизированными ($U_н$, В: *1* 250; *2*—500; *3* 750; *4*—1000) и с фольговыми обкладками ($U_н$, В: *1'*—250; *2'*—500; *3'*—750) при естественном и воздушном охлаждении и превышении температуры корпуса на 10°С

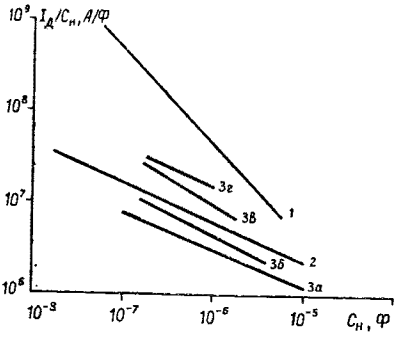


Рис. 8.2.2. Зависимость значений удельных токов конденсаторов с выступающими фольговыми обкладками (*1*), с двухсторонней металлизацией (*2*) при $U_н$=160—250 В и односторонне металлизированными обкладками (*3*) ($U_н$, В: *а* — 250; *б* — 500; *в* — 750; *г* — 1000)

ров этого типа на частоте f. Значение R_{tm} при этом берется согласно условиям охлаждения для одиночного конденсатора или для конденсатора, работающего в составе батареи (см. § 4.4); T'_{0max} — максимальная температура охлаждающей среды в ТУ, $T_{0\,max}$ — в заданных условиях.

Для облегчения выбора конденсатора необходимо иметь таблицы или графики со значениями $R_{тm}C_н$ (рис. 8.2.1), $T_{тд}$ (табл. 6.1.2), $U_{п.п}$, $I_д/C_н$ (рис. 8.2.2) для конденсаторов разных типов и номинальных параметров.

Кроме приведенных выше условий, для длительных режимов работы проверяется выполнение условия

$$P \leqslant P_{кр}/к_з, \qquad (8.2.8)$$

где P — мощность тепловыделения в выбранном конденсаторе при заданных U и f; $P_{кр}$ — критическая мощность тепловыделения (см. § 4.5); $к_з$ — коэффициент запаса (см. § 6.1), а также условия:

$$U_{тд} \geqslant \sqrt{2}U, \qquad (8.2.9)$$

где $U_{тд}$ — предельно допустимая по кратковременной электрической прочности амплитуда напряжения (см. § 4.6, 6.2).

При этом способе выбора индивидуальные характеристики конденсаторов не полностью учитываются (например, полагается, что tgδ конденсаторов одного типа не зависит от номинальных значений емкости и напряжения).

Для более полного использования энергетических характеристик конденсаторов и получения наилучших массогабаритных показателей конденсаторного оборудования необходимо выбирать такие конденсаторы, для которых вышеуказанные неравенства удовлетворяются с минимальным запасом.

С этой целью для выбранных упрощенным способом конденсаторов проверяется выполнение условий (8.2.1)—(8.2.4) и при необходимости корректируются выбранные номинальные параметры конденсаторов так, как это рекомендуется в § 8.1.

Пример. Необходимо выбрать конденсатор для следующих условий эксплуатации. Действующее значение напряжения $U=100$ В, частота $f=10$ кГц, температура охлаждающей среды $T_{0\,max}=+40$°С, охлаждение естественное. Емкость батареи конденсаторов 5 мкФ ± 20%, режим электрического нагружения простой, непрерывный $\tau_т=10^4$ ч.

Учитывая данные табл. 8.1.2, а также § 4.7, в указанных условиях целесообразно использовать конденсатор типа К72-11-125В-1,0 мкФ. Для этого конденсатора по данным табл. 6.2.4 и § 6.2 $U_{т.д}$ может быть принято равным $\sqrt{2}\cdot 125$ В, а $U_{п.п.д} = 2\sqrt{2}U_н \approx 355$ В, т. е. условия (8.2.1) и (8.2.2) выполняются.

Согласно данным § 4.4 и приложения 3 полное максимальное тепловое сопротивление этого конденсатора при работе в составе батареи с плотной упаковкой конденсаторов составит примерно 13 К/Вт. Предельно допустимая мощность тепловыделения в заданных условиях согласно (6.1.6) равна

$$P_д = \frac{110-40}{13} = 5{,}4 \text{ Вт}.$$

В заданном режиме мощность тепловыделения согласно формуле (5.3) и § 5.3 будет

$$P = 100^2 \cdot 2\pi \cdot 10^4 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-3} = 0{,}5 \text{ Вт},$$

где значение tgδ принято равным $0{,}8\cdot 10^{-3}$ в соответствии с данными ТУ.

Таким образом, условие (8.2.1) выполняется с большим запасом. Предельно допустимое действующее значение тока в заданных условиях определим с учетом того, что в номинальном режиме конденсатор работает в прерывистом режиме ($t_р/T_ц = 0{,}5$; $T_ц = 50$ с) при $T_{0\,max} = +70$°С, $U = U_н = 125$ В.

Согласно формуле (2) из табл. 6.1.6 и с учетом (6.1.13), а также формулы (3) из табл. 6.1.6 для повторно-кратковременного стационарного теплового режима запишем

$$I_д = 7{,}9 \cdot \sqrt{\frac{110-40}{110-70}} \cdot \sqrt{\frac{25}{50}} = 7{,}4 \text{ А},$$

где $I_н = 7{,}9$ А — действующее значение тока в номинальном режиме при $T_{0\,max} = +70$°С. Действующее значение тока в заданном режиме равно $I = 100\cdot 2\pi\cdot 10^4 \times \times 10^{-6} = 6{,}4$ А, т. е. условие (8.2.2) также выполняется.

Условия (8.2.3) и (8.2.4) также выполняются. Таким образом, в заданных условиях можно применять конденсатор К72-11-125В-1,0 мкФ.

§ 8.3. Выбор конденсаторов для работы в непрерывном режиме при несинусоидальном напряжении

При типовых формах несинусоидального напряжения общий подход к выбору конденсаторов принципиально такой, как в § 8.1. Выбор может осуществляться: по графическим зависимостям допустимого рабочего напряжения от его параметров, приводимых в НТД, справочниках (см. приложение 6 и [В.11]), а также с помощью соотношений, которые даны в табл. 8.3.1, позволяющих охватить более широкий класс напряжений.

По значениям $R_{тm}C_н$ (рис. 8.2.1), $I_{д}/C_н$ (рис. 8.2.2) и коэффициента Г (табл. 6.1.7) выбирается конденсатор с номинальными параметрами, для которого с минимальным запасом удовлетворяются условия, приведенные в табл. 8.3.1. Если при этом требуемая величина емкости больше выбранной, то необходимо параллельное включение конденсаторов соответствующей емкости.

Поскольку такие способы выбора являются приближенными по причинам, изложенным в § 8.1 и 8.2, для отобранных типов необходимо уточнить допустимость применения конденсаторов в заданном ре-

жиме, т. е. с учетом индивидуальных параметров и характеристик проверить, выполняются ли для выбранных конденсаторов условия:

$$P_д \geqslant P \left(T_{тд} \geqslant T_m, \frac{P_{кр}}{K_з} \geqslant P \right); \quad (8.3.1)$$

$$I_д \geqslant I; \quad (8.3.2)$$

$$I_{тд} \geqslant I_m, \quad (8.3.3)$$

где T_m, P, I, I_m — соответственно максимальная внутренняя температура, мощность тепловыделения, действующее значение и амплитуда тока конденсатора в заданном режиме; $P_д$, $T_{тд}$, $\frac{P_{кр}}{K_з}$, $I_д$, $I_{тд}$ — предельно допустимые для этого конденсатора значения.

При проверке условий (8.3.1) и (8.3.2) необходимо учесть, что предельно допустимые мощность тепловыделения и действующее значение тока зависят от характера теплового режима работы конденсатора (см. § 6.1).

Кроме условий (8.3.1)—(8.3.3), характеризующих тепловой режим конденсатора, необходимо проверить выполнение условий

$$U_{п.п.д} \geqslant U_{п.п}; \quad (8.3.4)$$

$$U_{тд} \geqslant U_m, \quad (8.3.5)$$

где $U_{п.п.д}$, $U_{тд}$ — предельно допустимый полный размах и амплитуда напряжения заданных параметров для выбранного типономинала конденсатора, определение которых рассмотрено в § 6.2, 7.4.

Пример. Необходимо выбрать номинальные параметры конденсатора типа К75-10 для работы в батарее общей емкостью 12 мкФ при следующих условиях. Воздействующее напряжение имеет гребенчатую форму (рис. 5.1.2, *г*) с фронтами косинусоидальной формы ($t_{ф1} = t_{ф2} = 10^{-4}$ с). Частота повторения $f_п = 400$ Гц. Значение $U_{п.п} = 800$ В, $U_m = 600$ В. Режим работы непрерывный, $\tau_у = 10^4$ ч. Охлаждение конденсатора естественное воздушное, $T_{о\,max} = +70°C$.

Для конденсаторов К75-10 величины $U_{п.п.д}$ и $U_{тд}$ в первом приближении могут быть приняты равными $2\sqrt{2}\ U_н$ и $\sqrt{2}U_н$ (см. § 6.2). Учитывая это, из соотношения (8.3.4) следует, что номинальные напряжения конденсатора должны быть

$$U_н \geqslant \frac{U_{п.п.д}}{2\sqrt{2}} = 280 \text{ В};$$

$$U_н \geqslant \frac{U_{тд}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{600}{\sqrt{2}} = 425 \text{ В}.$$

Таким образом, дальнейший выбор производим для конденсаторов с номинальными напряжениями $U_н = 500$; 750, 1000 В.

Значение tgδ конденсаторов К75-10 находим на частоте $f_c = \frac{0{,}3}{t_ф} = \frac{0{,}3}{10^{-4}} = 3 \cdot 10^3$ Гц. По данным ТУ на частоте $f = 3 \cdot 10^3$ Гц $\text{tg}\delta \approx 10^{-2}$ (при $T_c \approx 85°C$).

Для напряжения заданной формы по соотношению из табл. 8.3.1 определяем

$$R_{тm} C_н = \frac{105-70}{1{,}1 \cdot 800^2 \cdot 400 \cdot 10^{-2}} =$$

$$= 1{,}24 \cdot 10^{-5} \text{ КФ/Вт}.$$

Согласно рис. 8.2.1, значение $R_{тm}C_н \leqslant 1{,}24 \cdot 10^5$ КФ/Вт имеют конденсаторы с $U_н = 500$ В и $C_н \leqslant 0{,}2 \cdot 10^{-6}$ Ф, $U_н = 750$ В и $C_н \leqslant 0{,}31 \cdot 10^{-6}$ Ф, $U_н = 1000$ В и $C_н \leqslant 1{,}2 \cdot 10^{-6}$ Ф.

По соотношению из табл. 8.3.1 для напряжения заданной формы получаем значение

$$I_д / C_н = \frac{\pi \cdot 800}{2} \cdot \sqrt{\frac{400}{10^{-4}}} = 2{,}5 \cdot 10^7 \text{ А/Ф}.$$

Используя кривые 3, *б—г* (рис. 8.2.2), находим, что значением $I_д/C_н \geqslant 2{,}5 \times 10^7$ А/Ф обладают конденсаторы с $U_н = 500$ В и $C_н \leqslant 0{,}25 \cdot 10^{-7}$ Ф, $U_н = 750$ В и $C_н \leqslant 0{,}16 \cdot 10^{-6}$ Ф, $U_н = 1000$ В и $C_н \leqslant 0{,}3 \cdot 10^{-6}$ Ф.

Для напряжения заданной формы по формуле табл. 8.3.1 определяем значение

$$\Gamma = \frac{1{,}56 \cdot 800}{10^{-4}} = 0{,}124 \text{ МАс}^{1.2}/\text{Ф}.$$

По табл. 6.1.7 находим, что коэффициент $\Gamma \geqslant 0{,}124$ имеют конденсаторы с $U_н = 750$ В и $C_н \leqslant 0{,}33$ мкФ, а также с $U_н = 1000$ В и $U_н \leqslant 0{,}47$ мкФ.

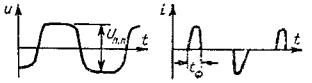
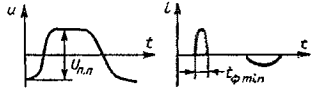
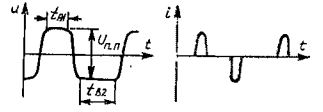
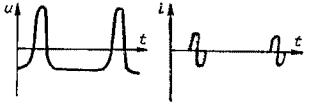
Из сопоставления полученных по разным критериям значений $C_н$ и $U_н$ следует, что для работы в заданных условиях можно выбрать конденсаторы К75-10-750В-0,15 мкФ и К75-10-1000В-0,22 мкФ.

Объем первого конденсатора составляет примерно 0,035 дм^3, а батареи $V_{б1} = \frac{12}{0{,}15} \times 0{,}035 \cdot 1{,}2 \approx 3{,}4$ дм^3. Объем второго конденсатора около 0,076 дм^3, а батареи $V_{б2} = \frac{12}{0{,}22} \cdot 0{,}076 \cdot 1{,}2 \approx 5{,}0$ дм^3. Окончательно выбираем конденсатор К75-10-750В-0,15 мкФ, так как объем батареи емкостью 12 мкФ, составленной из таких параллельно включенных конденсаторов, значительно меньше, чем объем батареи из конденсаторов К75-10-1000В-0,22 мкФ.

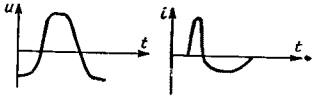
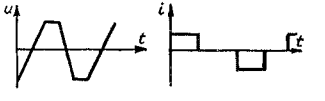
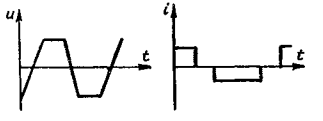
Выбор конденсаторов для работы при сложных формах несинусоидального напряжения. Принципы выбора конденсаторов в этом случае такие же, как и в предыдущих параграфах.

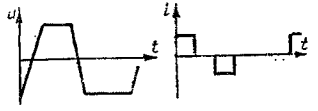
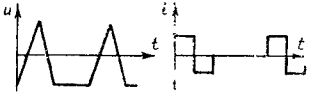
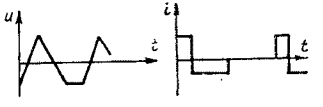
Выбрав предварительно тип и номинальные параметры конденсатора, с учетом требуемой величины емкости, полного размаха напряжения на конденсаторе, его амплитуды, частоты основной гармоники, удельных параметров конденсаторов (см.

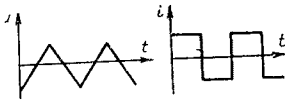
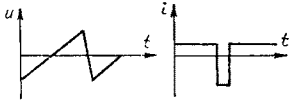
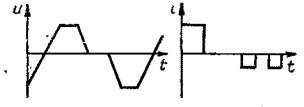
Таблица 8.3.1

Форма напряжения и тока конденсатора	Параметр	Соотношения для выбора конденсаторов
	$t_{\phi 1} = t_{\phi 2} = t_\phi$ $t_{в1} = t_{в2}$	$R_{тm} C_н \leqslant \dfrac{T_{mд} - T_{0\ max}}{1{,}5 U^2_{п.п} f_п \operatorname{tg}\delta_c \lg \dfrac{1{,}8}{f_п t_\phi}}$ $\Gamma \geqslant \dfrac{1{,}11 U_{п.п}}{\sqrt{t_\phi}}; \quad \dfrac{I_д}{C_н} \geqslant \dfrac{\pi U_{п.п}}{2} \sqrt{\dfrac{f_п}{t_\phi}}$
	$t_{в1} = t_{в2}$ $t_{\phi 1} \neq t_{\phi 2}$ $t_\phi = \dfrac{t_{\phi 1} + t_{\phi 2}}{2}$ при $\dfrac{t_{\phi\ max}}{t_{\phi\ min}} \leqslant 5$	$R_{тm} C_н \leqslant \dfrac{T_{mд} - T_{0\ max}}{1{,}5 U^2_{п.п} f_п \operatorname{tg}\delta_c \lg \dfrac{1{,}8}{f_п t_\phi}}$ $\Gamma \geqslant \dfrac{1{,}11 U_{п.п}}{\sqrt{t_{\phi\ min}}}; \quad \dfrac{I_д}{C_н} \geqslant \dfrac{\pi U_{п.п}}{2\sqrt{2}} \sqrt{f_п (1/t_{\phi 1} + 1/t_{\phi 2})}$
	$t_\phi = \dfrac{t_{\phi 1} + t_{\phi 2}}{3}$ при $\dfrac{t_{\phi\ max}}{t_{\phi\ min}} > 5$ $t_{в1} \neq t_{в2}$ $t_{\phi 1} = t_{\phi 2} = t_\phi$	$R_{тm} C_н \leqslant \dfrac{T_{mд} - T_{0\ max}}{1{,}4 U^2_{п.п.} f_п C \operatorname{tg}\delta_c \lg \dfrac{t_{в1} + t_\phi}{0{,}17\ t_\phi}}$ $\Gamma \geqslant \dfrac{1{,}11 U_{п.п}}{\sqrt{t_\phi}}; \quad \dfrac{T_д}{C_н} \geqslant \dfrac{\pi U_{п.п}}{2} \sqrt{\dfrac{f_п}{t_\phi}}$
	$t_{в1} = 0$ $t_{\phi 1} = t_{\phi 2}$	$R_{тm} C_н \leqslant \dfrac{T_{mд} - T_{0\ max}}{1{,}1 U^2_{п.п} f_п \operatorname{tg}\delta_c}$ $\Gamma \geqslant \dfrac{1{,}56 U_{п.п}}{\sqrt{t_\phi}}; \quad \dfrac{I_д}{C_н} \geqslant \dfrac{\pi U_{п.п}}{2} \sqrt{\dfrac{f_п}{f_\phi}}$

Продолжение табл. 8.3.1

Форма напряжения и тока конденсатора	Параметр	Соотношения для выбора конденсаторов
	$t_{в1} = 0$ $t_{ф1} \neq t_{ф2}$ $t_ф = \frac{t_{ф1} + t_{ф2}}{2}$	$R_{тm}C_н \leqslant \frac{T_m - T_{0\,m}}{1{,}1U^2_{п\,п}\, f_п \operatorname{tg}\delta_c}$; $\quad \Gamma \geqslant 1{,}11U_{п.п}\sqrt{1/t_{ф1} + 1/t_{ф2}}$ $\frac{I_д}{C_н} \geqslant \frac{\pi U_{п.п}}{2\sqrt{2}}\sqrt{f_п(1/t_{ф1} + 1/t_{ф2})}$
	$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$ $t_{в1} = t_{в2}$	$R_{тm}C_н \leqslant \frac{T_{mд} - T_{0\,max}}{1{,}5U^2_{п.п}\, f_п \operatorname{tg}\delta_c \lg \frac{1{,}4}{f_п\, t_ф}}$ $\Gamma \geqslant \frac{U_{п.п}}{\sqrt{t_ф}}$; $\quad I_д/C_н \geqslant U_{п.п}\sqrt{\frac{2f_п}{t_ф}}$
	$t_{ф1} = t_{ф2}$ $t_{в1} = t_{в2}$ $t_ф = \frac{t_{ф1} + t_{ф2}}{2}$ при $\frac{t_{ф\,max}}{t_{ф\,min}} \leqslant 5$ $t_ф = \frac{t_{ф1} + t_{ф2}}{3}$ при $\frac{t_{ф\,max}}{t_{ф\,min}} > 5$	$R_{тm}C_н \leqslant \frac{T_{mд} - T_{0\,max}}{1{,}5U^2_{п.п} f_п \operatorname{tg}\delta_c \lg \frac{1{,}4}{f_п\, t_ф}}$ $\Gamma \geqslant \frac{U_{п.п}}{\sqrt{t_{ф min}}}$ $I_д/C_н \geqslant U_{п.п}\sqrt{f_п(1/t_{ф1} + 1/t_{ф2})}$

Форма напряжения и тока конденсатора	Параметр	Соотношения для выбора конденсаторов
	$t_{в1} \neq t_{в2}$ $t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$	$R_{тm}C_н \leq \dfrac{T_{mд} - T_{0max}}{1{,}4U^2_{п.п} f_п tg\,\delta_c \lg \dfrac{t_{в1} + t_ф}{0{,}22 t_ф}}$ $\Gamma \geq \dfrac{U_{п.п}}{\sqrt{t_ф}}; \dfrac{I_д}{C_н} \geq U_{п.п}\sqrt{\dfrac{2f_п}{t_ф}}$
	$t_{в1} = 0$ $t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$	$R_{тm}C_н \leq \dfrac{I_{mд} - T_{0\,max}}{0{,}9U^2_{п.п} f_п tg\,\delta_c}$ $\Gamma \geq \dfrac{1{,}41\,U_{п.п}}{\sqrt{t_ф}}; I_д/C_н \geq U_{п.п}\sqrt{\dfrac{2f_п}{t_ф}}$
	$t_{в1} = 0$ $t_{ф1} \neq t_{ф2}$ $t_ф = \dfrac{t_{ф1} + t_{ф2}}{2}$	$R_{тm}C_н \leq \dfrac{T_{mд} - T_{0\,max}}{0{,}9U^2_{п.п} f_п tg\,\delta_c}$ $\Gamma \geq U^2_{п.п}\sqrt{1/t_{ф1} + 1/t_{ф2}}$ $I_д/C_н \geq U_{п.п}\sqrt{f_п(1/t_{ф1} + 1/t_{ф2})}$

Форма напряжения и тока конденсатора	Параметр	Соотношения для выбора конденсаторов
	$t_{в1} = t_{в2} = 0$ $t_{ф1} = t_{ф2} = \dfrac{1}{2f_п}$	$R_{тт} C_н \leqslant \dfrac{T_{тд} - T_{0max}}{0.54 U^2_{п.п} \; f_п \, tg \, \delta_c}$ $I_д / C_н \geqslant 2 \, U_{п.п} \, f_п$
	$t_{ф1} > t_{ф2} = t_ф$ $t_{в1} = t_{в2} = 0$	$R_{тт} C_н \leqslant \dfrac{T_{тд} - T_{0\,max}}{0{,}73 \, U^{\,2}_{п.п} f_п \, tg\delta_c \left(\dfrac{1/f_п}{1/f_п - t_ф} \right)^2 \lg \dfrac{0{,}7}{f_п t_ф}}$ $\Gamma \geqslant \dfrac{U_{п.п}}{\sqrt{t_ф}}; \; I_д / C_н \geqslant U_{п.п} \sqrt{1/t_{ф1} \, t_{ф2}}$
	$t_{ф1} = t_{ф2} = t_{ф3} = t_ф$	$R_{тт} C_н \leqslant \dfrac{T_{тд} - T_{0\,max}}{1{,}1 \, U^{\,2}_{пп} \, f_п \, tg \, \delta_c \, \lg \dfrac{1{,}2}{f_п t_ф}}$ $\Gamma \geqslant \dfrac{U_{п.п}}{\sqrt{t_ф}}; \; I_д / C_н \geqslant U_{п.п} \sqrt{\dfrac{3 f_п}{2 t_ф}}$

§ 4.7) необходимо выполнить проверку допустимости применения таких конденсаторов в заданном режиме работы.

Это осуществляется так же, как и при несинусоидальном напряжении типовых форм, проверкой соотношений (8.3.1)—(8.3.5).

Мощность тепловыделения, действующее значение тока в заданном режиме рассчитываются с помощью методов, приведенных в § 5.2 и 5.3, а предельно допустимые значения — в соответствии с рекомендациями § 6.1.

Проверка выполнения условия (8.3.3) осуществляется для участков кривой, где имеют место большие значения $\frac{du}{dt}$. Если кривая несинусоидального напряжения сложной формы задана в виде ограниченного спектра, например, в случае применения конденсаторов в резонансных фильтрах, то проверки условия (8.3.3) не требуется.

Если заданы мгновенное напряжение и ток конденсатора, то производятся кусочно-линейная аппроксимация кривых и определение значений величин, находящихся в левой части соотношений (8.3.1)—(8.3.5).

Здесь, как и в случае напряжения синусоидальной формы и несинусоидальных типовых форм, может быть использован принцип предварительного выбора конденсаторов по удельной мощности тепловыделения, удельному действующему значению тока. Для этого необходимо знать предельно допустимые удельные значения этих величин для каждого конденсатора и рассчитать удельные значения для заданного режима, полагая емкость конденсатора равной 1 Ф.

§ 8.4. Выбор конденсаторов для работы в прерывистых режимах

Исходная информация для выбора конденсаторов в прерывистых режимах должна содержать:

— характеристики режима работы конденсатора (длительность нагружения $t_р$, длительность паузы $t_п$ или длительность цикла $T_ц$);

— данные о форме и параметрах воздействующего напряжения (значение, частота, длительность фронтов, вершин и т. д.);

— диапазон температур охлаждающей среды и условий охлаждения (естественное или принудительное охлаждение и т. п.);

— требуемое для данного применения значение гамма-процентного ресурса;

— необходимое значение емкости (или батареи), допустимые пределы отклонений емкости, допустимое значение изменения емкости конденсаторов в течение срока службы.

В прерывистых режимах для выбранного конденсатора также должны удовлетворяться с минимальным запасом соотношения (8.2.1)—(8.2.5).

В связи с тем, что заранее неизвестно, какой из факторов (тепловыделение, локальный нагрев или частичные разряды) будет решающим при выборе номинальных параметров конденсатора, то здесь, как и в предыдущих случаях, необходима последовательная проверка выполнения всех условий, которые определяют допустимость эксплуатации конденсатора.

Особенностью выбора конденсатора в таких режимах является то, что в них предельно допустимые мощность тепловыделения и действующее значение тока могут быть значительно выше, чем в непрерывных режимах работы (см. § 6.1).

Второй особенностью выбора конденсаторов для прерывистых режимов работы является то, что более высокие и относительно кратковременные тепловые нагрузки обуславливают нагрев преимущественно тех элементов конструкции конденсатора, которые имеют малые тепловые постоянные времени — внутренние предохранители, контактные узлы, выводы.

Кроме того, имеются некоторые особенности в определении предельно допустимого напряжения, исходя из характеристик частичных разрядов (см. § 7.3, 7.5, 7.6).

В связи с возможностью увеличения предельно допустимых нагрузок области применения конденсаторов различной конструкции (см. табл. 8.1.1—8.1.3) в прерывистых режимах нагружения сдвигаются в сторону более высоких частот. Так, область, в которой удельные характеристики конденсаторов с полярным диэлектриком выше, чем у конденсаторов с неполярным диэлектриком, может простираться до десятков килогерц и более (см. например, рис. 4.7.1) по сравнению с сотнями герц при непрерывном режиме работы.

Пример. Необходимо выбрать конденсатор для работы в батарее общей емкостью 12 мкФ. Режим работы прерывистый $T_ц = 20$ с, $t_р = 2$ с. Форма напряжения, параметра и условия охлаждения указаны в § 8.3 (см. пример).

Используя справочные данные, рассмотрим выбор конденсаторов типа К75-10 и К75-25. Учитывая данные § 8.3 (см. пример), номинальное напряжение конденсатора типа К75-25 должно быть $U_н \geqslant 750$ В. Определив предельно допустимые удельные мощность тепловыделения, действующее значение тока в прерывистом режиме и значение коэффициента Г, выбираем конденсатор типа К75-10-750В-0,33 мкФ (ограничивающий фактор в этом случае — импульсное тепловыделение в переходном сопротивлении между контактными узлами и обкладками). Объем батарен емкостью 12 мкФ из таких конденсаторов составит около 2,7 дм^3.

По справочным данным выбираем также конденсатор К75-25-1000В-2,0 мкФ, для которого предельно допустимая частота повторения в непрерывном режиме 400 Гц и амплитуда тока импульса 100 А. В связи с этим определяем амплитуду импульса тока в заданном режиме:

$$I_m = \frac{\pi \cdot 800 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 25 \text{ А}.$$

Так как последняя меньше предельно допустимой (§ 7.1), то применение этого конденсатора в заданном режиме возможно. Объем одного конденсатора равен $0{,}65\times0{,}7\times1{,}15=0{,}52$ дм^3. Объем батареи без учета зазоров $V_б=\frac{12{,}0}{2{,}0}\cdot0{,}52=3{,}1$ дм^3.

Поскольку объемы батарей из конденсаторов К75-10-750В-0,33 мкФ и К75-25-1кВ-2,0 мкФ близки (2,7 и 3,1 дм^3), то предпочтение отдаем последнему типу конденсаторов, так как монтаж батареи из шести конденсаторов типа К75-25 более простой и дешевый, чем батареи из тридцати шести конденсаторов типа К75-10.

§ 8.5. Особенности выбора конденсаторов при наличии постоянной составляющей напряжения

При выборе конденсатора для работы в пульсирующем напряжении исходными данными, кроме климатических воздействий и механических нагрузок, являются: требуемое значение емкости, форма и параметры переменной составляющей, значения постоянной составляющей, а также параметры режима нагружения.

При пульсирующем напряжении выбор конденсаторов, как и в предыдущих случаях, необходимо производить с учетом всех факторов, определяющих работоспособность конденсаторов (см. шестую главу). Поскольку при пульсирующем напряжении на конденсатор одновременно воздействуют и переменная и значительная постоянная составляющие напряжения, то выбор конденсатора в этих условиях производится по тем же принципам, что и для переменного напряжения, не содержащего постоянную составляющую (см. § 8.2—8.4), но с учетом совместного действия переменной и постоянной составляющих (см. § 6.2, 7.8).

Таким образом, конденсатор, который выбирается для работы при пульсирующем напряжении, должен удовлетворять всем требованиям, вытекающим из наличия переменной составляющей, т. е. мощность тепловыделения (и соответственно максимальная внутренняя температура), действующее значение тока и амплитуда тока, полный размах переменной составляющей не должны превосходить значений, допустимых для выбираемого конденсатора.

Кроме этого, при пульсирующем напряжении необходимо, чтобы амплитуда напряжения на конденсаторе (сумма амплитуды переменной составляющей и среднего значение напряжения — см. § 5.1) не превосходила допустимого для данного конденсатора значения (см. § 7.8). Последнее обычно указывается в ТУ для непрерывного режима работы и иногда — для прерывистого.

Если пульсирующее напряжение имеет переменную составляющую, носящую импульсный характер, то часто оптимальным вариантом оказывается применение импульсного конденсатора, который будет работать в облегченном режиме неполного разряда.

Предварительный выбор типа конденсатора для работы в пульсирующем напряжении существенно облегчается, если известны области оптимального (по получаемым удельным параметрам) использования конденсаторов различных типов при пульсирующем напряжении (рис. 8.5.1). Этой же цели служат зависимости допустимого переменного напряжения от частоты, а также такие характеристики, как зависимости, приведенные на рис. 8.2.1 и 8.2.2.

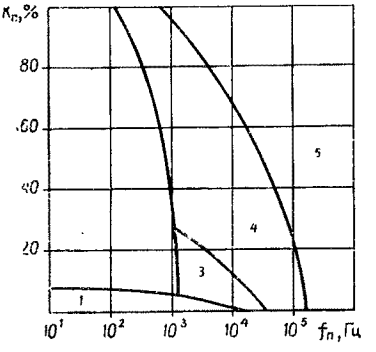


Рис. 8.5.1. Ориентировочные области целесообразного применения конденсаторов различных конструкций в зависимости от частоты основной гармоники и коэффициента пульсации. Виды конденсаторов: *1* — оксидно-электролитические большой емкости; *2* — лавсановые, бумажно-лавсановые, металлобумажные, оксидно-электролитические (малой емкости); *3* — лакопленочные; *4* — полипропиленовые и керамические (большой емкости); *5* — керамические (средней и большой емкости)

Для предварительного выбора конденсатора, работающего при пульсирующем напряжении, целесообразен приближенный способ, изложенный в § 8.2. Дальнейшее уточнение допустимости применения конденсатора при пульсирующем напряжении производится для переменной составляющей напряжения (согласно рекомендациям предыдущих параграфов), для постоянной составляющей и мгновенного значения напряжения на конденсаторе.

Выбранный конденсатор должен удовлетворять следующим условиям:

$$U_{од}\geqslant U_0; \qquad (8.5.1)$$

$$U_{m\sim д}\geqslant U_{m\sim}; \qquad (8.5.2)$$

$$U_{mд}\geqslant U_0+U_п^+, \qquad (8.5.3)$$

где U_0 — постоянная составляющая напряжения в заданном режиме; $U_{од}$ — предельно допустимое для данного конденсатора и требуемого гамма-процентного ресурса значение постоянной составляющей напряжения (см. § 6.2); $U_п^+$ — пиковое (максимальное) положительное значение переменной составляющей напряжения в заданном режиме; $U_{mд}$ — предельно допустимая для данного конденсатора амплитуда напряжения, определяе-

мая запасом по кратковременной электрической прочности (см. § 6.2).

Кроме (8.5.1) и (8.5.2) для полярных конденсаторов должно удовлетворяться условие

$$U_0 \geqslant |U_{\text{п}}^-|, \qquad (8.5.4)$$

где $U_{\text{п}}^-$ — пиковое (максимальное) отрицательное значение переменной составляющей напряжения в заданном режиме.

Для конденсаторов с оксидным диэлектриком обычно $U_{m\text{д}} = U_{\text{н}}$ (см. § 6.2). Поэтому (8.5.3) трансформируется в условие $U_{\text{н}} \geqslant U_m$, где $U_m = U_0 + U_{\text{п}}^-$ — амплитуда мгновенного напряжения.

При выборе неполярных оксидно-электролитических конденсаторов при $U_{m\text{д}} = U_{\text{н}}$ должны выполняться условия:

$$U_{\text{н}} \geqslant U_0 + U_{\text{п}}^+; \qquad (8.5.5)$$

$$U_{\text{н}} \geqslant U_0 + |U_{\text{п}}^-|. \qquad (8.5.6)$$

В случае синусоидальной, а также несинусоидальной переменной составляющих напряжения, у которых $U_{\text{п}}^+ = |U_{\text{п}}^-|$, условием, достаточным для выбора конденсаторов, является

$$U_{\text{н}} \geqslant U_0 + U_{m\sim}, \qquad (8.5.7)$$

где $U_{m\sim} = \dfrac{U_{\text{п.п}}}{2}$ — амплитуда переменной составляющей.

При выборе конденсаторов для работы в пульсирующем напряжении возникает задача определения не только номинальных параметров конденсаторов, но и емкости батареи.

Максимально допустимая емкость батареи конденсаторов должна быть такой, чтобы обеспечить заданный коэффициент пульсации (или амплитуду переменной составляющей) напряжения на батарее, определяемого требованиями к этому параметру по условиям работы устройства или блока, в котором применяется батарея конденсаторов.

Она должна быть также такой, чтобы выполнялись условия (8.5.1)—(8.5.7), т. е. вторым критерием при определении минимально допустимой емкости батареи конденсаторов служит обеспечение работоспособности и необходимых показателей долговечности самих конденсаторов.

Если переменный ток, протекающий через конденсатор, имеет синусоидальную форму, то условиями, определяющими минимально допустимую емкость конденсаторной батареи при напряжении, содержащем постоянную составляющую, являются:

$$C_{\text{д min}} = \frac{I}{\sqrt{2}U'_{m\sim}\pi f_1}; \qquad (8.5.8)$$

$$C_{\text{д min}} = \frac{I}{\sqrt{2}U_{m\text{д}\sim}\pi f_1}, \qquad (8.5.9)$$

где $U'_{m\sim}$ — амплитуда переменной составляющей напряжения, допустимая по условиям работы устройства или блока, в котором применяются конденсаторы; $U_{m\text{д}\sim}$ — предельно допустимая амплитуда переменной составляющей напряжения на конденсаторе, определяемая из условия обеспечения работоспособности и необходимых показателей долговечности конденсаторов (см. седьмую главу).

При этом если $U'_{m\sim} > U_{m\text{д}\sim}$, то $C_{\text{д min}}$ определяется из условия (8.5.9), а при $U'_{m\sim} < U_{m\text{д}\sim}$ — из (8.5.8), т. е. из двух значений $C_{\text{д min}}$ берется большее.

Но если емкость $C_{\text{д min}}$ окончательно получена из условия (8.5.9), то коэффициент пульсаций напряжения (амплитуда переменной составляющей или полный размах напряжения) будет меньше, чем это требуется по условиям работы устройства или блока, в котором применяются конденсаторы.

При несинусоидальной форме тока, протекающего через конденсаторы, минимально допустимая емкость батареи также определяется из двух условий, приведенных выше. В этом случае для конденсатора выбранного типа согласно рекомендациям, приведенным в седьмой главе, определяется предельно допустимое значение переменной составляющей напряжения. Затем, используя соотношения между током и напряжением конденсаторов (см. § 5.2) при заданных значениях тока, его форме и других параметрах, определяем минимально допустимую емкость батареи конденсаторов по упоминавшимся двум условиям. Окончательно выбирается большее из двух значений емкости батареи.

На практике часто возникает альтернатива применения при пульсирующем напряжении конденсаторов с органическим и оксидным диэлектриком. Конденсаторы первого вида по сравнению с конденсаторами второго вида имеют меньшие удельные емкости и заряды (особенно при низких напряжениях), однако конденсаторы с органическим диэлектриком допускают работу при бо́льших значениях переменной составляющей пульсирующего напряжения и удельного действующего значения тока (см. § 4.7).

Ориентировочные границы областей целесообразного применения конденсаторов этих видов приведены на рис. 8.5.1, а также в табл. 8.1.1.

Если выбрано несколько типов конденсаторов (это соответствует точкам пересечения границ на рис. 8.5.1), то окончательно выбирается вариант, обеспечивающий минимальный объем, массу, габариты или комплексный технико-экономический показатель батареи конденсаторов.

Пример 1. Для работы необходимо выбрать конденсатор при пульсирующем напряжении в непрерывном режиме. Значение $U_0 = 240$ В. Максимально допустимый по условиям работы устройства коэффициент пульсаций $k_{\text{п}} = \dfrac{U_{m1}}{U_0} = 0{,}1$. Ам-

плитуда переменного тока, протекающего через батарею, 10 А. Частота тока 1000 Гц. Форма тока синусоидальная. Охлаждение конденсаторов естественное воздушное при $T_{o\,min}=0$ и $T_{o\,max}=+50°C$. Требуемое значение $\tau_т=5\cdot10^3$ ч.

Основываясь на данных § 4.7 и рис. 8.5.1, рассмотрим применение в заданных условиях следующих типов конденсаторов: МБГО и К50-7.

При заданном коэффициенте пульсации амплитуда переменной составляющей согласно соотношению из § 5.1 составляет $U'_{m\sim}=k_п U_o=0{,}1\cdot240=24$ В. Амплитуда напряжения $U_m=U_o+U'_{m\sim}=240+24=264$ В. Из условия (8.5.1) следует, что необходимо выбрать конденсатор типа МБГО с номинальным напряжением $U_н\geqslant240$ В, из условия (8.5.3) — $U_н\geqslant264$ В.

Таким образом, могут быть выбраны конденсаторы типа МБГО с $U_н=300$; 400; 500 и 600 В.

Для конденсаторов типа МБГО по справочным данным на частоте $f=1000$ Гц предельно допустимая амплитуда переменной составляющей напряжения синусоидальной формы равна 0,05 $U_н$, т. е. $U_{mд\sim}=15$; 20; 25; 30 В соответственно для конденсаторов с вышеуказанными номинальными напряжениями.

Так как для конденсаторов с $U_н=300$ и 400 В $U_{mд\sim}<U'_{m\sim}$, то минимально допустимое значение емкости батареи конденсаторов определяется из условий (8.5.9):

$$C_1=\frac{10/\sqrt{2}}{\sqrt{2}\cdot15\cdot\pi\cdot10^3}=1060\text{ мкФ}$$

для конденсаторов с $U_н=300$ В и $C_2=795$ мкФ — для конденсаторов с $U_н=400$ В.

Для конденсаторов типа МБГО при $U_н=500$ и 600 В минимально допустимая емкость батареи определяется из условия (8.5.8), так как $U_{mд\sim}$ для этих конденсаторов больше, чем $U_{m\sim}$:

$$C_3=C_4=\frac{10/\sqrt{2}}{\sqrt{2}\cdot24\cdot10^3}=662\text{ мкФ}.$$

Поскольку конденсаторы с $U_н=600$ В имеют бо́льшие массу и габариты, чем при $U_н=500$ В, то из дальнейшего рассмотрения их исключаем.

По справочным данным выбираем максимально номинальные емкости единичных конденсаторов при $U_н=300$ В ($C_н=30{,}0$ мкФ, $V_1=0{,}128$ дм^3); $U_н=400$ В ($C_н=20$ мкФ, $V_1=0{,}14$ дм^3) и $U_н=500$ В ($C_н=20$ мкФ, $V_1=0{,}174$ дм^3).

Определяем число конденсаторов в батареях по трем вариантам как целую часть от $\left\{\frac{C_i}{C_{iн}}\pm1\right\}N_1=\frac{1060}{30}=35$; $N_2=40$ и $N_3=33$ шт.

Ориентировочно объемы батарей для трех вариантов конденсаторов составят $V_{Б1}=N_1V_1=4{,}5$; $V_{Б2}=5{,}6$; $V_{Б3}=5{,}75$ дм^3.

Для конденсаторов типа К50-7 согласно справочным данным предельно допустимую величину амплитуды напряжения на частоте 1000 Гц, равную 24 В, не имеет ни один конденсатор. Поэтому, определив по графику $U(f)$ для конденсатора, имеющего $C_н=200{,}0$ мкФ и $U_н=250$ В, $U_{д\sim}=1{,}5$ В и допустимую амплитуду (при $T_{o\,max}=50°C$) $U_{mд\sim}=\sqrt{2}\cdot U_{д\sim}=\sqrt{2}\cdot1{,}5=2{,}13$ В, по (8.5.9), находим емкость батареи $C_Б=\frac{10/\sqrt{2}}{2\cdot2{,}13\cdot10^3}=7500$ мкФ (37 конденсаторов).

Объем единичного конденсатора $V_1=0{,}067$ дм^3 и объём всей батареи $V_{Б5}=37\cdot0{,}067\cdot1{,}25=3{,}12$ дм^3.

Таким образом, в заданных условиях целесообразно использовать конденсаторы типа К50-7 как более дешевые и обеспечивающие наименьший объем батареи.

§ 8.6. Особенности выбора конденсаторов для работы в импульсном режиме

Согласно рассмотренной в § 5.1 классификации электрических режимов конденсатор может работать с неполным, полным разрядом и разрядом с изменением полярности напряжения на нем, в режиме одиночных импульсов и пачек импульсов.

Эти и другие особенности импульсного режима работы (малая длительность и большая амплитуда импульсов тока, связанная с ними высокая скорость изменения напряжения на зажимах конденсатора, повышенное тепловыделение) должны учитываться при выборе конденсаторов для работы в импульсном режиме. Задача такого выбора сводится к определению типа и номинальных параметров конденсатора, который в заданных условиях эксплуатации обеспечит наименьшие массу, габариты, а в некоторых случаях — стоимость батареи.

Как правило, эта цель достигается, если выбирается импульсный конденсатор, параметры номинального режима которого (частота повторения, характер разряда, параметры разрядного тока и т. д.) близки к заданным. Однако в ряде случаев (малая амплитуда и относительно большая длительность импульсов, средние и высокие частоты их повторения и т. д.) может оказаться целесообразным применение в импульсном режиме не специализированных импульсных конденсаторов, параметры номинального режима работы которых далеки от заданных, а конденсаторов для переменного синусоидального напряжения с комбинированным и неполярным диэлектриком или же конденсаторов широкого назначения.

При малых значениях емкости (менее сотых долей микрофарады) в случае средних и высоких частот повторения обычно применяют керамические импульсные конденсаторы. При большой емкости наименьшие массогабаритные параметры батарей обеспечивают конденсаторы с органическим диэлектриком.

На выбор высоковольтных импульсных конденсаторов большое влияние оказывает также величина напряжения на выводах относительно потенциала земли, т. е. при выборе таких конденсаторов необходимо учитывать допустимое напряжение, приходящееся на изоляцию пакета от корпуса. Это, в частности, послужило одним из оснований к отказу от металлических корпусов и переходу на корпуса из изоляционных материалов (см. § 3.2).

Как и в самом общем случае, при импульсном режиме работы выбранный конденсатор должен удовлетворять условиям, изложенным в § 8.1.

При инфранизких частотах повторения (порядка десятых долей герца для крупногабаритных и единиц герц для малогабаритных конденсаторов), когда мощность тепловыделения в конденсаторе незначительна, для выбираемого конденсатора должны удовлетворяться следующие основные условия:

$$\begin{gathered} U_{m\text{д}} \geqslant U_m; \\ U_{\text{п.п.д}} \geqslant U_{\text{п.п}}; \\ U_{\text{од}} \geqslant U_{\text{о}}; \\ I_{m\text{д}} \geqslant I_m, \end{gathered} \qquad (8.6.1)$$

где $U_{m\text{д}}$, $U_{\text{п.п.д}}$, $U_{\text{од}}$, $I_{m\text{д}}$ — соответственно предельно допустимые для данного конденсатора и заданного ресурса амплитуда, полный размах и постоянная составляющая мгновенного напряжения, а также амплитуда импульса тока, определенные для него при заданных параметрах электрического режима работы (см. § 6.1, 6.2).

Так, при определении предельно допустимой амплитуды импульса тока конденсаторов с металлизированными обкладками исходят из ограничения энергии локального импульсного тепловыделения в переходном сопротивлении контактный узел — обкладки. Для конденсаторов с фольговыми обкладками основным фактором, ограничивающим амплитуду импульсного тока, является механическая прочность токопроводящих элементов конструкции (см. § 6.1).

Факторами, ограничивающими величину зарядного напряжения, полного размаха напряжения и постоянной составляющей импульсного напряжения, являются: кратковременная электрическая прочность, мощность и энергия частичных разрядов, интенсивность электрохимического старения (см. § 4.6, 6.2).

В правой части неравенства (8.6.1) находятся те же величины, рассчитанные (или известные как исходные данные) для заданного режима работы.

При частотах повторения бо́льших, чем десятые доли (для крупногабаритных) и единицы герц (для малогабаритных конденсаторов), мощность тепловыделения и действующее значение тока в конденсаторах становятся достаточно высокими, чтобы повлиять на их работоспособность. Поэтому при таких частотах повторения кроме условий (8.6.1) для выбираемого конденсатора должны выполняться также условия

$$P_{\text{д}} \geqslant P; \; I_{\text{д}} \geqslant I, \qquad (8.6.2)$$

где $P_{\text{д}}$, $I_{\text{д}}$ — предельно допустимые для данного конденсатора и заданного ресурса условий охлаждения мощность тепловыделения и действующее значение тока (см. § 6.1); P и I — мощность тепловыделения и действующее значение тока, рассчитанные согласно данным § 5.2 и 5.3 для конденсатора выбранной емкости в заданном режиме работы.

В ряде случаев, когда ни один из выбранных конденсаторов не удовлетворяет условиям (8.6.1) и (8.6.2), может потребоваться последовательное соединение конденсаторов. Тогда расчет U_m, $U_{\text{п.п}}$, I_m, P, I осуществляется с учетом того, что при последовательном соединении конденсаторов напряжение, приходящееся на единичный конденсатор, уменьшается. Значение этого напряжения должно определяться с учетом отклонения величины емкости конденсаторов от номинальной.

Если необходимая по исходным требованиям емкость конденсатора превышает номинальные значения для выбранных конденсаторов, то в таких случаях требуется параллельное включение единичных конденсаторов. При этом ток, приходящийся на единичный конденсатор, уменьшается, что следует учитывать при выборе его типа и номинальных параметров.

Пример 1. Необходимо выбрать конденсатор для следующего импульсного режима работы: напряжение зарядки $U_{\text{з}} = 50$ кВ, длительность зарядки около 10 с, зарядка производится постоянным током, частота повторения импульсов 0,1 Гц, амплитуда разрядного тока 5,0 кА, длительность разрядного тока 10^{-4} с. Форма разрядного тока — прямоугольный импульс. Требуемая емкость $C = 10$ мкФ, 90%-ный гамма-срок службы $\tau_{\text{ус}} = 10^3$ ч. Условия охлаждения: $T_{\text{о min}} = 0°\text{C}$; $T_{\text{о max}} = +45°\text{C}$, охлаждение естественное воздушное.

Согласно исходным данным определяем форму напряжения на конденсаторе:

$$U_{\min} = U_{\text{з}} - \frac{1}{C}\int_0^{t_{\text{и}}} i dt = 5 \cdot 10^4 - \frac{1}{10^{-5}} \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 10^{-4} = 0 \text{ В},$$

т. е. за время действия импульса тока конденсатор разряжается до нулевого уровня. Таким образом, полагаем, что на конденсатор воздействует пилообразное

напряжение с параметрами: $U_m = U_{\text{п.п}} = 50$ кВ, $f_{\text{п}} = 0{,}1$ Гц, $t_{\text{ф}} = 10^{-4}$ с.

Согласно справочным данным и учитывая требуемое значение емкости и напряжения U, предварительно выбираем следующие типы конденсаторов: ИК50-2У4 (пять штук параллельно), ИК50/2-2,5М-У4 (две штуки параллельно). Так как параметры номинальных режимов работы равны или превосходят заданные, то проверку условий (8.6.1) и (8.6.2) для них не производим. Окончательно выбираем конденсаторы типа ИК50-2У4, обеспечивающие минимальную массу батареи $m_{б1} = 5 \times 110 = 550$ кг (для ИК50-2,5М-У4-$m_{б2} = 2 \times 422 = 844$ кг).

Пример 2. Необходимо выбрать конденсатор емкостью 5,0 мкФ для работы в следующем режиме. Амплитуда напряжения $U_m = 1000$ В, заряд конденсатора колебательный $t_з = 10^{-4}$ с. Импульс разрядного тока конденсатора с амплитудой 100 А имеет форму прямоугольника длительностью $t_{\text{и}} = 10^{-5}$ с. Частота повторения $f_{\text{п}} = 5 \cdot 10^3$ Гц. Условия охлаждения: $T_{\text{о min}} = 0$, $T_{\text{о max}} = +50°\text{C}$, охлаждение естественное воздушное. Необходимый 90%-ный гамма-ресурс $\tau_\gamma = 10^4$ ч. Режим электрического нагружения прерывистый простой (см. § 5.1).

Определяем амплитуду переменной составляющей напряжения на конденсаторе:

$$U_{m\sim} = 0{,}5 \frac{I_m t_{\text{и}}}{C} = \frac{0{,}5 \cdot 10^2 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{5 \cdot 10^{-6}}} = 100 \text{ В}.$$

Таким образом, конденсатор работает в режиме неполного разряда $U_{\text{п.п}} = 2U_{m\sim} = 200$ В.

Согласно справочным данным, учитывая значения $f_{\text{п}}$, U_m и C, выбираем конденсатор К75-47-2,5В-1,0 мкФ, имеющий массу 300 г.

Проверяем допустимость его применения в заданных условиях. Допустимая глубина разряда по справочным данным равна:

$$K \frac{t_{\text{и}}^{0,15}}{\sqrt{f_{\text{п}}}} = 2{,}5 \cdot \frac{(10^{-5})^{0,15}}{\sqrt{5 \cdot 10^3}} =$$

$$= \frac{2{,}5 \cdot 0{,}18}{70{,}7} = 0{,}064.$$

В нашем случае глубина разряда $200/1000 = 0{,}2$. Так как в заданном режиме глубина разряда превосходит допустимую по ТУ, то применять этот конденсатор в заданных условиях нельзя.

Учитывая относительно высокую частоту повторения импульсов, выбираем конденсаторы с неполярным пленочным диэлектриком типа К72-11А, имеющие $U_{\text{н}} \cdot \sqrt{2} \geqslant 10^3$ В, и К78-4 при $U_{\text{н}} \geqslant 1000$ В. Конденсатор типа К72-11А выбираем с $U_{\text{н}} \geqslant 10^3/\sqrt{2} = 710$ В, т. е. $U_{\text{н}} = 750$ В. Номинальную емкость конденсатора берем наибольшую — $C_{\text{н}} = 0{,}47$ мкФ.

Предельно допустимое действующее значение тока для конденсатора типа К72-11А-750В-0,47 мкФ определим приближенно по данным ТУ. Согласно ТУ этот конденсатор допускает работу при переменном синусоидальном напряжении $U = 750$ В с максимальной частотой $f = 15$ кГц. Тогда $I_{\text{д}} = U_{\text{н}} \cdot 2\pi f C_{\text{н}} = 750 \cdot 2\pi \times 15 \cdot 10^3 \cdot 0{,}47 \cdot 10^{-6} = 33{,}2$ А.

В заданном режиме действующее значение тока определяем согласно формулам § 5.2 для переменной составляющей напряжения заданной формы и параметров:

$$I = U_{\text{п.п}} C \sqrt{f_{\text{п}} (\pi^2/8 t_{\text{ф1}} + 1/t_{\text{ф2}})} =$$

$$= 200 \cdot 0{,}47 \cdot 10^{-6} \sqrt{5 \cdot 10^3 (\pi^2/8 \cdot 10^{-4} + 1/10^{-5})} \approx$$

$$\approx 2{,}1 \text{ А}.$$

Так как допустимое действующее значение тока больше, чем в заданном режиме, то по этому условию применение выбранного конденсатора в заданном режиме возможно. К такому же выводу можно прийти, проверив условие (8.6.2) относительно мощности тепловыделения.

Условия (8.6.1) для конденсатора К72-11А-750В-0,47 мкФ в заданном режиме также выполняются.

Конденсаторы типа К-78-4 имеют наибольшее номинальное напряжение $U_{\text{н}} = 500$ В, поэтому необходимо последовательное включение двух конденсаторов. С целью выравнивания распределения постоянной составляющей напряжения между последовательными конденсаторами целесообразно их шунтировать резисторами ($R \ll R_{\text{из}}$). Значение $U_{\text{п.п}}$ единичного конденсатора будет 100 В.

Так как это конденсаторы с металлизированными обкладками, то определение номинальной емкости осуществляют сначала по условию (8.6.1) для амплитуды импульсного тока. Согласно формулам табл. 8.3.1 для соответствующей формы тока определяем значение коэффициента Г, которым должен обладать конденсатор:

$$\Gamma \geqslant \frac{U_{\text{п.п}}}{\sqrt{t_{\text{ф min}}}} = \frac{100}{\sqrt{10^{-5}}} = 0{,}032 \text{ МАс}^{1/2}/\text{Ф},$$

По табл. 6.1.7 для конденсаторов типа К75-10, К73-11, К77-1, имеющих $400 \leqslant U_{\text{н}} \leqslant 630$ В, определяем, что значения номинальных емкостей, у которых $\Gamma \geqslant 0{,}032$, меньше 2,2 мкФ. Поэтому принимаем, что в заданном режиме по критерию импульсного локального тепловыделения допустимо применять конденсаторы типа К78-4 с $U_{\text{н}} = 500$ В и $C_{\text{н}} \leqslant 2{,}2$ мкФ.

Проверяем допустимость применения в заданных условиях конденсатора, имеющего $C_{\text{н}} = 2{,}2$ мкФ. Используя справочные данные и рекомендации § 6.1, находим для данного конденсатора предельно допустимое действующее значение тока $I_{\text{д}} = 4{,}9$ А. Действующее значение тока в заданном режиме через конденсатор, имеющий $C_{\text{н}} = 2{,}2$ мкФ, при $U_{\text{п.п}} = 100$ В составит:

$$I = 100 \cdot 2{,}2 \cdot 10^{-6} \times$$

$$\times \sqrt{5 \cdot 10^3 (\pi^2/8 \cdot 10^{-4} + 1/10^{-5})} \approx 5 \text{А}.$$

Так как этот ток незначительно превышает допустимый $I_д$, то, учитывая, что $T_{0\,max}=+50°C$, а не $+70°C$ по ТУ, применение данного конденсатора в заданных условиях допустимо. Условие $P_д \geqslant P$ (8.6.2) проверяем, применяя принцип эквивалентирования режимов (см. § 7.10).

Согласно этому параграфу можно приближенно найти $U_{п.п.д}$, приравняв мощности тепловыделения в режиме ТУ и заданном:

$$U^2 \cdot 2\pi f C \operatorname{tg}\delta = 1{,}5 U^2_{п.п} f_п C \operatorname{tg}\delta_c \lg \frac{1{,}8}{f_п t_ф},$$

где $t_ф \approx \dfrac{10^{-5}+10^{-4}}{3} = 3{,}7 \cdot 10^{-5}$ с (см. § 5.3). Из этого равенства при $f_п = 5 \times 10^3$ Гц, полагая $\operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\delta_c$, находим

$$U_{п.п.д} = \frac{60}{\sqrt{2}} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{2\pi}{1{,}5 \lg \dfrac{1{,}8}{5 \cdot 10^3 \cdot 3{,}7 \cdot 10^{-5}}}} = 85 \text{ В}.$$

Поскольку полученное значение $U_{п.п.д}$ меньше, чем в заданном режиме ($1/2 \times 200$ В), то необходимо учесть, что предельно допустимая мощность при температуре охлаждающей среды $T_{0\,max} = +50°C$ возрастет по сравнению с допустимой мощностью при $T_{0\,max}=+70°C$ согласно данным § 6.1 в $\left(T_{mд}-T''_{0max}\right) / \left(T_{mд}-T'_{0max}\right)$ раз, т. е. в $(90-50)/(90-70)=2$, а значение напряжения в $\sqrt{2}$ раз, т. е. $U_{п.п.д} = \sqrt{2} \cdot 85 = 120$ В. Таким образом, в заданных условиях можно применять конденсаторы типа К78-4-500В-2,2 мкФ.

Для получения требуемого значения емкости батареи необходимо последовательное соединение двух групп параллельно включенных конденсаторов с номинальной емкостью $C_н = 2{,}2$ мкФ (по пять штук), т. е. всего в батарее будет десять таких конденсаторов.

Сопоставление объема этой батареи с объемом батареи из 11 штук конденсаторов К72-11-750В-0,47 мкФ показывает, что в данных условиях целесообразно использовать конденсаторы типа К78-4.

Литература к разделу II

Глава 5

5.1. *Роткоп Л. Л., Спокойный Ю. Е.* Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА. М.: Советское радио, 1979. 230 с.

5.2. *Атабеков Г. И.* Теоретические основы электротехники. Ч. 1. М.: Энергия, 1970. 592 с.

5.3. Основы теории цепей / *Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил* и др. М.: Энергия, 1975. 752 с.

5.4. *Ермуратский В. В., Ермуратский П. В.* Расчет мощности тепловыделения в конденсаторах при типовых формах напряжения.— Электричество, 1976, № 11, с. 45—51.

5.5. *Гончаров Ю. П., Панасенко Н. В., Ермуратский В. В.* Расчет допустимого напряжения на коммутирующих конденсаторах в автономных инверторах.— Электротехника, 1975, № 7, с. 15—18.

5.6. *Багалей Ю. В., Набока Б. Г.* Расчет мощности потерь в коммутирующих конденсаторах с учетом их температурно-частотных характеристик.— Изв. вузов. Электромеханика, 1976, № 2, с. 225—230.

5.7. *Шадрин В. М.* Расчет потерь в электрических конденсаторах при воздействии импульсного напряжения.— Электричество, 1979, № 2, с. 36—41.

5.8. *Ануфриев Ю. А., Мезенин О. Л.* Расчет потерь энергии в коммутирующем конденсаторе тиристорного преобразователя.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1975, вып. 5 (11), с. 9—19.

5.9. *Ануфриев Ю. А., Картышев Б. И., Гусев В. Н.* Некоторые общие случаи расчета потерь в конденсаторах, работающих в импульсном режиме.— Электронная техника. Сер. 8. Радиодетали, 1969, вып. 4 (17), с. 3—13.

5.10. *Мезенин О. Л.* Метод расчета потерь энергии в конденсаторе при кратковременной импульсной нагрузке.— Изв. вузов. Радиоэлектроника, 1979, т. XXII, № 12, с. 85—87.

5.11. *Койков С. Н., Мезенин О. Л.* Теоретический анализ характеристик конденсаторов при воздействии несинусоидального напряжения.— Электричество, 1981, № 2, с. 32—38.

5.12. *Табакс К. К., Фрейманис У. А.* К расчету температурного поля в анизотропной призме с внутренними источниками тепла.— В кн.: Ученые записки Рижского политехнического ин-та, т. XIV. Электроэнергетика, вып. 5. Рига: Звайгзне, 1965, с. 255—268.

5.13. *Фрейманис У. А.* К тепловому расчету бумагомасляного конденсатора.— В кн.: Ученые записки Рижского политехнического ин-та, т. XIV, вып. 5. Рига: Звайгзне, 1965, с. 269—276.

5.14. *Назаров Н. И.* Геометрические факторы и тепловые свойства сильноточного конденсатора.— Изв. вузов. Энергетика, 1966, № 6, с. 33—39.

5.15. *Sawicki I.* Przebigi temperatury w kondensatorze energeticznym.— Rozprawy elektrotechnicze, 1967, v. 13, p. 37—45.

5.16. *Мартиросян Ф. А., Саркисян В. С., Чатинян Ю. С.* и др. Определение силовых цилиндрических конденсаторов в установившемся режиме.— Изв. вузов. Энергетика, 1971, № 5, с. 25—30.

5.17. *Акопян В. А., Петросян Н. А., Восканов С. Е.* и др. К вопросу теплового расчета металлобумажных конденсаторов переменного тока.— Электротехника, 1971, № 7, с. 40—42.

5.18. *Хачатрян П. О.* К вопросу теплового расчета цилиндрических конденсаторов пе-

ременного тока.— В кн.: Труды Всесоюз. науч.-исслед. и проектн.-конструкт. ин-та комплексного электрооборудования. Т. 7. Ереван, 1975, с. 301—306.

5.19. *Чатинян Ю. С., Акопян В. А., Хачатрян П. О.* Определение перегревов силовых цилиндрических конденсаторов в установившемся режиме.— В кн.: Межвузовский сборник научных трудов Ереванского политехнического ин-та. Электротехника, вып. 2. Ереван, 1975, с. 227—235.

5.20. *Чатинян Ю. С.* Аналитическое исследование установившихся и нестационарных температурных полей в цилиндрических конденсаторах.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1976, вып. 10 (66), с. 10—13.

5.21. *Чатинян Ю. С., Акопян В. А., Паронян Д. Б.* Исследование температурных полей в конденсаторах радиаторного типа.— В кн.: Труды Всесоюз. науч.-исслед. проектн.-конструкт. ин-та комплексного электрооборудования. Т. 9. Ереван, 1977, с. 170—181.

5.22. *Рубанович С. Г., Чатинян Ю. С.* Расчет напряжения теплового пробоя силовых конденсаторов прямоугольной формы.— Электричество, 1978, № 1, с. 31—34.

5.23. *Рубанович С. Г., Чатинян Ю. С.* О протекании во времени теплового пробоя конденсатора.— Электричество, 1979, № 6, с. 66—68.

5.24. *Варшавский Д. С., Лангваген Е.* Расчет максимального нагрева корпуса конденсатора переменного тока.— Электротехническая промышленность, 1966, вып. 268, с. 14—16.

5.25. *Варшавский Д. С.* К вопросу о выборе расстояния между конденсаторами в батареях.— Промышленная энергетика, 1970, № 3, с. 31—38.

5.26. *Варшавский Д. С.* Температурные режимы конденсаторных установок.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1971, вып. 6, с. 37—41.

5.27. *Чебаков В. А., Чеховский И. Р., Варшавский Д. С.* Расчет цилиндрических конденсаторов.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1973, вып. 5 (14), с. 10—14.

5.28. Расчет температурного поля металлобумажного цилиндрического конденсатора / *В. А. Чебаков, Ю. В. Чи-Дун-Чи, И. Р. Чеховский* и др.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1973, вып. 12 (32), с. 11—13.

5.29. К тепловому расчету комплексных конденсаторов установок / *В. В. Сироткин, И. Р. Чеховский, Ю. В. Чи-Дун-Чи* и др.— В кн.: Конденсаторы при несинусоидальных напряжениях. Кишинев: Штиинца, 1977, с. 75—81.

5.30. *Чеховский И. Р.* Тепловой расчет силовых электрических конденсаторов с вертикальным расположением секций в пакете.— Изв. вузов. Электромеханика, 1970, № 11, с. 1258—1262.

5.31. *Чеховский И. Р.* Расчет силовых электрических конденсаторов.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1970, вып. 1, с. 16—18.

5.32. *Чеховский И. Р.* Расчет температурного поля и охлаждения силового электрического конденсатора.— Электротехника, 1971, № 6, с. 43—44.

5.33. *Груздев В. И., Черкасов В. П.* Расчет теплового режима мощных накопительных конденсаторов.— Электронная техника. Сер. 8. Радиодетали, 1970, вып. 3 (20), с. 15—26.

5.34. *Черкасов В. Н.* Температурное поле конденсатора при повторно-периодическом (прерывистом) режиме работ.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали, 1972, вып. 3 (28), с. 3—9.

5.35. *Кременецкий И. И., Одинцов Л. С., Редькин Г. К.* К расчету температурного и токового режимов металлобумажных конденсаторов в формирующих линиях.— Электричество, 1971, № 7, с. 53—57.

5.36. *Кременецкий И. И.* Расчет температуры перегрева конденсаторов, работающих в формирующих линиях.— Электронная техника. Сер. 8. Радиодетали, 1970, вып. 3 (20), с. 27—34.

5.37. *Кузьмин М. П.* Электрическое моделирование нестационарных процессов теплообмена. М.: Энергия, 1974. с. 418.

5.38. *Ильин В. П.* Численные методы решения задач электрооптики. Новосибирск: Наука, 1974. с. 202.

5.39. *Римский В. К.* Влияние неравномерности тепловыделения в конденсаторах на их стационарные внутренние тепловые сопротивления.— В кн.: Применение конденсаторов в электронных и электротехнических установках. Кишинев: Штиинца, 1979, с. 32—37.

5.40. *Ермуратский В. В., Ермуратский П. В., Римский В. К.* Расчет тепловых сопротивлений конденсаторов с учетом неравномерности распределения тепловыделения по объему.— В кн.: Методы обеспечения качества конденсаторов и конденсаторных структур. Киев: изд. о-ва Знание УССР, 1977, с. 20—21.

5.41. *Ермуратский В. В., Ермуратский П. В., Римский В. К.* Некоторые возможности экспериментального уточнения теплофизических коэффициентов и тепловых сопротивлений конденсаторов.— В кн.: Методы обеспечения качества конденсаторов и конденсаторных структур. Киев: изд. о-ва Знание УССР, 1977, с. 19—20.

5.42. *Карплюс У.* Моделирующие устройства для решения задач теории поля. М.: ИЛ, 1962, с. 487.

5.43. *Гураевский М. Н.* Особенности применения конденсаторов в тиристорных преобразователях энергии.— Электронная техника. Радиодетали и радиокомпоненты. Сер. 5, вып. 4 (23), 1977, с. 17—28.

5.44. *Меерович Л. А., Зеличенко Л. Г.* Импульсная техника. М.: Советское радио, 1954. 760 с.

6.1. *Переселенцев И. Ф., Гинзбург Е. Л.* Рабочая температура конденсаторов с хлордифениловой пропиткой.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1974, вып. 7 (39), с. 6—9.

6.2. *Воробьев А. А., Воробьев Г. А.* Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М.: Высшая школа, 1966. 244 с.

6.3. *Гедзюн В. А., Семенов А. И.* Работоспособность высоковольтных низкочастотных керамических конденсаторов.— Электронная промышленность, 1973, вып. 10 (24), с. 43—45.

6.4. Исследование длительной электрической прочности бумажно-масляной изоляции / *Ю. С. Пинталь, Н. А. Матвиевская, П. В. Михеева* и др. Доклады научно-технической конференции по итогам НИР за 1968—1969 гг. М.: изд. МЭИ, 1969, с. 43—53.

6.5. *Назаров Н. И.* Ускоренные испытания конденсаторов.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1975, вып. 9 (53), с. 29—30.

6.6. Экспериментальная оценка ресурса конденсаторов для повышения коэффициента мощности / *Н. И. Назаров, Д. С. Варшавский, А. П. Киреев* и др.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1975, вып. 10 (54), с. 15—17.

6.7. Силовые конденсаторы с бумагой и полипропиленом в качестве диэлектрика / *Д. Занобетти, Г. А. Герч, Р. Дж. Хопкинс* и др. Доклад 15-04 на сессии СИГРЕ. Париж, 1970 (пер. № 73/73330).

6.8. *Переселенцев И. Ф., Гинзбург Е. Л.* Свойства хлорированных электроизоляционных жидкостей и влияние на них электрических разрядов.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1974, вып. 7 (39), с. 14—16.

6.9. *Переселенцев И. Ф., Гинзбург Е. Л.* Удельные характеристики силовых конденсаторов.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1977, вып. 1 (69), с. 11—13.

6.10. *Варшавский Д. С., Варшавский А. Д.* Закономерности поведения силовых конденсаторов при длительном приложении переменного напряжения.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1975, вып. 9 (53), с. 10—13.

6.11. *Щебенюк Л. А., Михайлусь Ю. В., Багалей Ю. В.* Исследование процессов старения бумажно-эпоксидного диэлектрика.— Изв. вузов. Электромеханика, 1975, № 12, с. 1312—1317.

6.12. *Щебенюк Л. А., Багалей Ю. В.* К разработке статистической модели старения твердого конденсаторного диэлектрика.— Вестник Харьковского политехнического ин-та, № 129. Электроэнергетика и автоматизация энергоустановок, вып. 5, 1977, с. 52—55.

6.13. *Антипов К. М., Александрова Н. П., Манн А. К.* Влияние режима работы конденсаторов на срок службы батарей.— Электрические станции, 1978, № 9, с. 45—47.

6.14. *Переселенцев И. Ф., Гинзбург Е. Л.* Газостойкость конденсаторного масла.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1973, вып. 7 (27), с. 5—8.

6.15. *Переселенцев И. Ф., Гинзбург Е. Л.* Влияние свойств конденсаторной бумаги на удельные характеристики и срок службы конденсаторов.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1973, вып. 7 (27), с. 12—15.

6.16. *Гинзбург Е. Л., Соколова А. С.* Применение двухслойного комбинированного диэлектрика в низковольтных конденсаторах.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1974, вып. 3 (35), с. 13—15.

6.17. *Переселенцев И. Ф., Гинзбург Е. Л., Жилкин В. Г.* Характеристики и срок службы конденсаторов, пропитанных стабилизированными хлорированными жидкостями.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1974, вып. 12 (44), с. 11—13.

6.18. *Гинзбург Е. Л., Переселенцев И. Ф., Жилкин В. Г.* Использование нефтяного масла для пропитки комбинированного диэлектрика в силовых конденсаторах.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1974, вып. 12 (44), с. 4—6.

6.19. Прогнозирование ресурса изделий электронной техники / *И. П. Булгакова, Л. Л. Кристаллинский, В. П. Курицын* и др.— Электронная промышленность, 1978, вып. 8 (68), с. 55—60.

6.20. *Переселенцев И. Ф., Гинзбург Е. Л.* Характеристики силовых конденсаторов при смешанном напряжении.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1978, вып. 6 (86), с. 9—10.

6.21. *Гинзбург Е. Л., Переселенцев И. Ф., Жилкин В. Г.* Влияние параметров разряда на ионизационные характеристики накопительных конденсаторов.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1974, вып. 3 (35), с. 4—5.

6.22. Электрическая прочность конденсаторной бумаги, пропитанной синтетической жидкостью.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1975, вып. 9 (53), с. 37—38.

6.23. *Рудь В. И.* Конденсаторы для схем с неполным разрядом.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого на-

пряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1979, вып. 6 (98), с. 8—9.
6.24. *Кучинский Г. С., Лысаковский Г. Г., Шилин О. В.* Вопросы надежности изоляции высоковольтных импульсных конденсаторов. — Электричество, 1978, № 9, с. 37—42.
6.25. *Кучинский Г. С., Лысаковский Г. Г., Шилин О. В.* Ускоренные испытания импульсных конденсаторов на надежность.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1976, вып. 1 (57), с. 10—12.
6.26. *Беспалов В. Д., Конотоп В. В.* Влияние параметров разрядного контура на ресурс импульсного конденсатора.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1973, вып. 1 (21), с. 15—17.
6.27. *Беспалов В. Д., Конотоп В. В., Липецкий В. Я.* Высоковольтные импульсные конденсаторы с бумажно-касторовым диэлектриком.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1974, вып. 3 (35), с. 16—17.
6.28. *Беспалов В. Д., Конотоп В. В.* Исследование ионизационных характеристик бумажно-касторового диэлектрика.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1974, вып. 7 (39), с. 17—19.
6.29. *Конотоп В. В.* Минимизация стоимости импульсных конденсаторов для мощных емкостных накопителей энергии.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1975, вып. 9 (53), с. 25—27.
6.30. *Беспалов В. Д., Конотоп В. В.* Ресурсные испытания конденсаторов в импульсном режиме.— Электротехника, 1974, № 1, с. 51—54.
6.31. *Беспалов В. Д., Конотоп В. В., Фертик С. М.* Удельные экономические характеристики импульсных коммутаторов.— Электричество, 1975, № 3, с. 68—70.
6.32. *Рудь В. И., Колосов В. И.* Зависимость ресурса конденсатора в импульсном режиме от напряженности электрического поля.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1974, вып. 3 (35), с. 3—4.
6.33. *Кирьянов В. В., Огнев Г. К.* Влияние величины рабочего напряжения на работоспособность комбинированного диэлектрика накопительных конденсаторов.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали, 1978, вып. 4 (29), с. 10—11.
6.34. Исследование возможности расширения области применения накопительных конденсаторов / *К. И. Степина, В. Л. Ушанова, С. Б. Иванов, О. Г. Усьяров.*— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали, 1973, вып. 1 (30), с. 49—56.
6.35. *Переселенцев И. Ф., Гинзбург Е. Д., Жилкин В. Г.* Выбор диэлектрика для силовых пленочно-бумажных конденсаторов. — Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1979, вып. 2 (94), с. 14—16.
6.36. *Беспалов В. Д., Конотоп В. В.* Кратковременная электрическая прочность конденсаторной бумаги, пропитанной касторовым маслом, на постоянном напряжении.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1973, вып. 1 (21), с. 24—27.
6.37. *Доценко Н. С., Соболев В. В.* Долговечность элементов радиоэлектронной аппаратуры. (Влияние влаги). Л.: Энергия, 1973. 159 с.
6.38. *Яворский Б. М., Детлаф А. А.* Справочник по физике. М.: Наука, 1977, с. 944.

Глава 7

7.1. Влияние параметров синусоидального режима на величину допустимого рабочего напряжения конденсаторов / *Н. И. Вахтель, А. Е. Карлик, К. И. Степина, В. Н. Черкасов.*— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты. 1978, вып. 4 (29), с. 15—21.
7.2. *Беленький Б. П., Балан Г. Н.* К оценке работоспособности высоковольтных конденсаторов в импульсном режиме с частичным разрядом емкости. — Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1973, вып. 1 (30), с. 57—64.
7.3. *Беленький Б. П.* К оценке работоспособности импульсных конденсаторов в прерывистых режимах.— Электронная техника. Сер. 8. Радиодетали, 1971, вып. 1 (22), с. 17—22.
7.4. *Иванова Г. Н., Кирьянов В. В.* Оценка работоспособности накопительных конденсаторов в импульсных прерывистых режимах работы.— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали и радиокомпоненты, 1978, вып. 4 (29), с. 3—9.
7.5. *Гусев О. А.* и др. Исследование работы импульсных конденсаторов в специальных режимах, вып. 13.— В кн.: Электрофизическая аппаратура. М.: Атомиздат, 1976, с. 113—118.
7.6. *Ермуратский В. В., Берзан В. П.* Определение допустимого рабочего напряжения силовых косинусных конденсаторов при частоте отличной от номинальной.— В кн.: Эффективность повышения частоты промышленного переменного тока. Кишинев: Штиинца, 1975, с. 41—45.
7.7. Определение допустимых нагрузок электролитических конденсаторов при пульсирующем напряжении повышенной частоты / *Ю. А. Ануфриев, Л. Г. Горская, И. В. Назарова, И. А. Новик.*— Электронная техника. Сер. 5. Радиодетали, 1979, вып. 6 (37), с. 14—19.

Глава 8

8.1. Основные принципы выбора металлобумажных конденсаторов для коммутирующих контуров тиристорных преобразо-

вателей / *В. П. Берзан, В. В. Ермуратский, М. Н. Гураевский* и др.— В кн.: Материалы VIII научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства. Вентильные преобразователи частоты. Томск: изд. ТГУ, 1974, с. 26.

8.2. *Ермуратский В. В., Берзан В. П.* Выбор конденсаторов для работы в силовых полупроводниковых преобразователях.— В кн.: Тезисы докладов V Всесоюзной научно-технической конференции. Повышение эффективности силовых полупроводниковых приборов и преобразователей на их основе. М.: Информэлектро, 1975, с. 60—61.

8.3. *Ермуратский В. В., Олещук В. И.* Применение конденсаторов типа К75-10 в тиристорных преобразователях.— Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1974, вып. 7 (54), с. 20—21.

8.4. Области рационального применения конденсаторов типа МБГЧ, К75-10, К42-15, КС, ЭС при трапецеидальном напряжении / *В. В. Ермуратский, В. П. Берзан, И. С. Гуцул* и др.— В кн.:Современные задачи преобразовательной техники. Ч. 5. Киев, 1975, с. 84—92.

8.5. *Ануфриев Ю. А.* Расчет и применение силовых конденсаторов. — Электронная промышленность, 1974, № 5, с. 22—29.

8.6. *Ануфриев Ю. А., Мезенин О. Л.* Выбор коммутирующего конденсатора тиристорного преобразователя.— В кн.: Конденсаторы при несинусоидальных напряжениях. Кишинев: Штиинца, 1977, с. 3—12.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Определение параметров схемы замещения диэлектриков и конденсаторов

Расчет параметров схемы замещения диэлектрика и конденсаторов по частотной зависимости $\mathrm{tg}\delta$. Параметры $C_i^* = \dfrac{C_i}{C_0}$ и $a_i = \dfrac{1}{\tau_i} = \dfrac{1}{R_i C_i}$ схемы замещения (см. рис. 4.3.2) определяются минимизацией функционала

$$\Delta = \max_{1 \le j \le n} \left| 1 - \frac{\mathrm{tg}\delta_{\mathrm{м}}(\omega_j)}{\mathrm{tg}\delta_{\mathrm{э}}(\omega_j)} \right|$$

по экспериментальной частотной зависимости $\mathrm{tg}\delta_{\mathrm{э}}(\omega_j)$. Задача состоит в построении согласно схеме замещения диэлектрика модельной функции $\mathrm{tg}\delta_{\mathrm{м}}(\omega)$ вида

$$\mathrm{tg}\delta_{\mathrm{M}}(\omega) = \sum_{i=1}^{m} \frac{C_i^*}{\dfrac{a_i}{\omega} + \dfrac{\omega}{a_i}}, \qquad (1.1)$$

аппроксимирующей $\mathrm{tg}\delta_{\mathrm{э}}(\omega)$ с заданной точностью на диапазоне $(\omega_{\min}, \omega_{\max})$.

В качестве узлов аппроксимации ω_j $(i=1, 2, ..., n)$ выбираем множество логарифмически равноудаленных точек $\omega_1 = \omega_{\min}$, $\omega_j = p\omega_{j-1}$, где $p>1$, $\omega_n = \omega_{\max}$. Критерием точности Δ служит максимальное относительное отклонение в узлах аппроксимирующей функции от исходной. Аппроксимирующая функция $\mathrm{tg}\delta_{\mathrm{M}}(\omega)$ определяется $2m$ параметрами C_i^* и a_i $(i=1, 2, ..., m)$. Следовательно, погрешность аппроксимации Δ есть функция $2m$ параметров

$$\Delta = \Phi_1(C_1^*, ..., C_m^*, a_1, ..., a_m).$$

Введем в рассмотрение векторы $C^* = (C_1^*, ..., C_m^*)$ и $a = (a_1, ..., a_m)$, принадлежащие m-мерным векторным пространствам C^m и A^m, а также их декартовое произведение R^{2m}, элементами которого являются векторы $r = (C_1^*, ..., C_m^*, a_1, ..., a_m)$. Тогда поставленная задача сводится к минимизации функционала $\Phi_1(r)$ в пространстве R^{2m}. Так как минимизация $\Phi_1(r)$ представляет значительные трудности, введем в рассмотрение функционал

$$\Phi_2(r) = \sum_{j=1}^{n} \left(1 - \frac{\mathrm{tg}\delta_{\mathrm{M}}(\omega_j)}{\mathrm{tg}\delta_{\mathrm{э}}(\omega_j)} \right)^2.$$

Установим связь между $\Phi_1(r)$ и $\Phi_2(r)$. Если заданную частотную зависимость $\mathrm{tg}\delta_{\mathrm{э}}(\omega)$ можно представить в виде (1.1), то

$$\min_{r \in R^{2m}} \Phi_1(r) = \min_{r \in R^{2m}} \Phi_2(r)$$

и минимум достигается при $\mathrm{tg}\delta_{\mathrm{M}}(\omega) \equiv \mathrm{tg}\delta_{\mathrm{э}}(\omega)$. Если же частотная зависимость $\mathrm{tg}\delta_{\mathrm{э}}(\omega)$ не представима в виде (1.1), то может быть

$$\min_{r \in R^{2m}} \Phi_1(r) \neq \min_{r \in R^{2m}} \Phi_2(r),$$

и тогда эти минимумы достигаются в различных точках пространства R^{2m}. Однако при $m \longrightarrow \infty$ расстояние между оптимальными точками стремится к нулю. При фиксированных m данные точки близки, поэтому целесообразно вести оптимизацию сначала для $\Phi_2(r)$, чтобы выйти в малую окрестность точки оптимума для $\Phi_1(r)$, а затем продолжить оптимизацию $\Phi_1(r)$. Рассматривая вопрос оптимизации функционала $\Phi_2(r)$, укажем на наличие следующих трудностей:

1) ввиду нелинейности $\Phi_2(r)$ возможно существование локальных экстремумов;

2) функционал $\Phi_2(r)$ имеет по a_i явно выраженный овражный вид; к тому же установлено, что эти овраги могут быть довольно плоскими;

3) градиентные методы минимизации указанного функционала неэффективны и очень чувствительны к ошибкам экспери-

Параметр	Диэлек					
	ПЭТФ		ПК	ПСУ	ПС	
	$T = 20°C$					
a_1	78,2	56,3	58,2	87,7·10	82,6	89,1
C_1^*	$2{,}7\cdot10^{-3}$	$3{,}1\cdot10^{-3}$	$2{,}1\cdot10^{-3}$	$1{,}3\cdot10^{-3}$	$8{,}6\cdot10^{-4}$	$4{,}1\cdot10^{-4}$
a_2	99,0·10	79,6·10	84,8·10	$90{,}0\cdot10^2$	90,0·10	$11{,}2\cdot10^2$
C_2^*	$2{,}4\cdot10^{-3}$	$3{,}5\cdot10^{-3}$	$1{,}0\cdot10^{-3}$	$1{,}4\cdot10^{-3}$	$5{,}1\cdot10^{-4}$	$3{,}3\cdot10^{-4}$
a_3	$77{,}1\cdot10^2$	$75{,}1\cdot10^2$	$81{,}0\cdot10^2$	$81{,}8\cdot10^3$	$79{,}4\cdot10^2$	$10{,}8\cdot10^3$
C_3^*	$6{,}1\cdot10^{-3}$	$7{,}2\cdot10^{-3}$	$1{,}8\cdot10^{-3}$	$2{,}3\cdot10^{-3}$	$4{,}3\cdot10^{-4}$	$3{,}5\cdot10^{-4}$
a_4	$74{,}4\cdot10^3$	$79{,}4\cdot10^3$	$72{,}2\cdot10^3$	$73{,}6\cdot10^4$	$72{,}9\cdot10^3$	$13{,}6\cdot10^4$
C_4^*	$1{,}2\cdot10^{-2}$	$1{,}9\cdot10^{-2}$	$3{,}2\cdot10^{-3}$	$4{,}0\cdot10^{-3}$	$3{,}7\cdot10^{-4}$	$3{,}9\cdot10^{-4}$
a_5	$65{,}6\cdot10^4$	$66{,}3\cdot10^4$	$65{,}6\cdot10^4$	$65{,}6\cdot10^5$	$66{,}3\cdot10^4$	$17{,}4\cdot10^5$
C_5^*	$1{,}9\cdot10^{-2}$	$2{,}3\cdot10^{-2}$	$5{,}4\cdot10^{-3}$	$8{,}4\cdot10^{-3}$	$3{,}3\cdot10^{-4}$	$5{,}7\cdot10^{-4}$
a_6	$54{,}2\cdot10^5$	$52{,}6\cdot10^5$	$59{,}1\cdot10^5$	$54{,}2\cdot10^6$	$59{,}1\cdot10^5$	$18{,}1\cdot10^6$
C_6^*	$2{,}0\cdot10^{-2}$	$2{,}6\cdot10^{-2}$	$8{,}1\cdot10^{-3}$	$7{,}8\cdot10^{-3}$	$3{,}0\cdot10^{-4}$	$9{,}1\cdot10^{-4}$
a_7	$48{,}3\cdot10^6$	$48{,}3\cdot10^6$	$53{,}1\cdot10^6$	$43{,}5\cdot10^7$	$47{,}8\cdot10^6$	$89{,}1\cdot10^6$
C_7^*	$1{,}8\cdot10^{-2}$	$2{,}4\cdot10^{-2}$	$1{,}3\cdot10^{-2}$	$5{,}7\cdot10^{-3}$	$2{,}8\cdot10^{-4}$	$4{,}8\cdot10^{-4}$
a_8	$39{,}5\cdot10^7$	$38{,}7\cdot10^7$	$52{,}6\cdot10^7$	—	$48{,}3\cdot10^7$	$22{,}0\cdot10^7$
C_8^*	$1{,}3\cdot10^{-2}$	$1{,}7\cdot10^{-2}$	$2{,}6\cdot10^{-2}$	—	$3{,}5\cdot10^{-4}$	$3{,}9\cdot10^{-4}$
Диапазон частот, Гц						
f_{min}	10	10	10	10^2	10	10
f_{max}	$1\cdot10^8$	$1\cdot10^8$	$1\cdot10^8$	$1\cdot10^8$	$1\cdot10^8$	$1\cdot10^8$
Δ, %	5,9	5,6	6,6	6,0	5,0	4,7
					Источник информации	
—	[В.2, с. 132, рис. 50, кривая *1*]	[Там же, кривая *2*]	[Там же, с. 156, рис. 60]	[Там же, с. 161, рис. 62]	[Там же, с. 47, рис. 17, кривая *1*]	[Там же, кривая *2*]

Параметр	Конден					
	ПЭТФ при $T°$, С					
	150	60	125	25	75	20
a_1	94,2	90,0	102,0	81,5	100,0	82,5
C_1^*	$1{,}1\cdot10^{-2}$	$1{,}7\cdot10^{-2}$	$1{,}9\cdot10^{-2}$	$3{,}8\cdot10^{-3}$	$8{,}8\cdot10^{-4}$	$1{,}8\cdot10^{-4}$
a_2	$13{,}7\cdot10^2$	$12{,}5\cdot10^2$	$12{,}0\cdot10^2$	$12{,}9\cdot10^2$	$18{,}4\cdot10^2$	$96{,}5\cdot10$
C_2^*	$9{,}1\cdot10^{-3}$	$1{,}4\cdot10^{-2}$	$1{,}6\cdot10^{-2}$	$3{,}5\cdot10^{-3}$	$1{,}3\cdot10^{-3}$	$1{,}5\cdot10^{-4}$
a_3	$17{,}1\cdot10^3$	$16{,}0\cdot10^3$	$14{,}9\cdot10^3$	$19{,}9\cdot10^3$	$18{,}2\cdot10^3$	$99{,}0\cdot10^2$
C_3^*	$1{,}5\cdot10^{-2}$	$1{,}4\cdot10^{-2}$	$1{,}7\cdot10^{-2}$	$8{,}3\cdot10^{-3}$	$3{,}7\cdot10^{-3}$	$1{,}4\cdot10^{-4}$
a_4	$19{,}4\cdot10^4$	$20{,}9\cdot10^4$	$20{,}9\cdot10^4$	$20{,}9\cdot10^4$	$23{,}0\cdot10^4$	$64{,}0\cdot10^3$
C_4^*	$2{,}7\cdot10^{-2}$	$1{,}3\cdot10^{-2}$	$1{,}9\cdot10^{-2}$	$1{,}7\cdot10^{-2}$	$8{,}6\cdot10^{-2}$	$1{,}1\cdot10^{-4}$
a_5	$25{,}0\cdot10^5$	$27{,}8\cdot10^5$	$27{,}8\cdot10^5$	$25{,}3\cdot10^5$	$27{,}8\cdot10^5$	$10{,}6\cdot10^5$
C_5^*	$3{,}0\cdot10^{-2}$	$1{,}1\cdot10^{-2}$	$1{,}7\cdot10^{-2}$	$2{,}1\cdot10^{-2}$	$1{,}3\cdot10^{-2}$	$3{,}7\cdot10^{-4}$
a_6	$36{,}4\cdot10^6$	$39{,}6\cdot10^6$	$36{,}4\cdot10^6$	$36{,}7\cdot10^6$	$40{,}0\cdot10^6$	—
C_6^*	$3{,}3\cdot10^{-2}$	$9{,}0\cdot10^{-3}$	$2{,}1\cdot10^{-2}$	$2{,}6\cdot10^{-2}$	$1{,}9\cdot10^{-2}$	—
Диапазон частот, Гц						
f_{min}	10	10	10	10	10	10
f_{max}	$1\cdot10^6$	$1\cdot10^6$	$1\cdot10^6$	$1\cdot10^6$	$1\cdot10^6$	$1\cdot10^5$
Δ, %	9,5	8,6	9,7	9,4	9,7	6,5
						Источник информации
		[В.2, с. 138, рис. 54, *б*]				

Таблица 1.1

трик

ПЭ	С	КОН-II	ПП при T, °С				
			100	80	60	40	23
90,0	74,4	90,9·10	52,7	56,6	55,4	55,4	56,6
$9{,}0\cdot10^{-4}$	$1{,}7\cdot10^{-3}$	$6{,}4\cdot10^{-3}$	$1{,}9\cdot10^{-4}$	$1{,}9\cdot10^{-4}$	$2{,}0\cdot10^{-4}$	$2{,}1\cdot10^{-4}$	$2{,}1\cdot10^{-4}$
90,0·10	$16{,}7\cdot10^{2}$	$98{,}0\cdot10^{2}$	66,6·10	63,5·10	64,7·10	64,7·10	63,5·10
$7{,}4\cdot10^{-4}$	$-1{,}3\cdot10^{-3}$	$6{,}6\cdot10^{-3}$	$1{,}4\cdot10^{-4}$	$1{,}6\cdot10^{-4}$	$1{,}6\cdot10^{-4}$	$1{,}8\cdot10^{-4}$	$1{,}9\cdot10^{-4}$
$10{,}1\cdot10^{3}$	$65{,}9\cdot10^{2}$	$73{,}6\cdot10^{3}$	$57{,}9\cdot10^{2}$	$62{,}2\cdot10^{2}$	$61{,}0\cdot10^{2}$	$62{,}2\cdot10^{2}$	$62{,}2\cdot10^{2}$
$7{,}1\cdot10^{-4}$	$1{,}1\cdot10^{-3}$	$6{,}0\cdot10^{-3}$	$1{,}5\cdot10^{-4}$	$1{,}7\cdot10^{-4}$	$1{,}8\cdot10^{-4}$	$1{,}8\cdot10^{-4}$	$1{,}8\cdot10^{-4}$
$90{,}0\cdot10^{3}$	$28{,}6\cdot10^{3}$	$79{,}4\cdot10^{4}$	$57{,}1\cdot10^{3}$	$63{,}5\cdot10^{3}$	$64{,}7\cdot10^{3}$	$64{,}7\cdot10^{3}$	$56{,}6\cdot10^{3}$
$7{,}1\cdot10^{-4}$	$-6{,}9\cdot10^{-3}$	$2{,}1\cdot10^{-2}$	$1{,}7\cdot10^{-4}$	$1{,}8\cdot10^{-4}$	$1{,}8\cdot10^{-4}$	$1{,}8\cdot10^{-4}$	$1{,}9\cdot10^{-4}$
$91{,}0\cdot10^{4}$	$19{,}8\cdot10^{4}$	$59{,}7\cdot10^{5}$	$66{,}4\cdot10^{4}$	$68{,}4\cdot10^{4}$	$67{,}7\cdot10^{4}$	$67{,}1\cdot10^{4}$	$68{,}4\cdot10^{4}$
$7{,}5\cdot10^{-4}$	$6{,}4\cdot10^{-3}$	$5{,}7\cdot10^{-2}$	$2{,}2\cdot10^{-4}$	$2{,}0\cdot10^{-4}$	$1{,}9\cdot10^{-4}$	$2{,}0\cdot10^{-4}$	$2{,}3\cdot10^{-4}$
$99{,}0\cdot10^{5}$	$32{,}8\cdot10^{5}$	$58{,}4\cdot10^{6}$	$56{,}0\cdot10^{5}$	$56{,}6\cdot10^{5}$	$55{,}4\cdot10^{5}$	$56{,}0\cdot10^{5}$	$56{,}6\cdot10^{5}$
$7{,}7\cdot10^{-4}$	0,247	$7{,}1\cdot10^{-2}$	$2{,}5\cdot10^{-4}$	$2{,}5\cdot10^{-4}$	$1{,}9\cdot10^{-4}$	$1{,}5\cdot10^{-4}$	$1{,}4\cdot10^{-4}$
$12{,}6\cdot10^{6}$	—	—	$69{,}1\cdot10^{6}$	$75{,}4\cdot10^{6}$	$68{,}4\cdot10^{6}$	$67{,}1\cdot10^{6}$	$73{,}4\cdot10^{6}$
$9{,}3\cdot10^{-4}$	—	—	$1{,}9\cdot10^{-3}$	$1{,}8\cdot10^{-3}$	$1{,}5\cdot10^{-3}$	$1{,}3\cdot10^{-3}$	$1{,}3\cdot10^{-3}$
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
10	10	10^{2}	10	10	10	10	10
$1\cdot10^{8}$	$1\cdot10^{5}$	$1\cdot10^{7}$	$1\cdot10^{7}$	$1\cdot10^{7}$	$1\cdot10^{7}$	$1\cdot10^{7}$	$1\cdot10^{7}$
6,3	9,7	5,1	8,8	7,9	7,4	7,1	9

для кривой $\mathrm{tg}\delta_э(\omega)$

$\mathrm{tg}\delta=$ $=\mathrm{const}=$ $=5\cdot10^{-4}$	[В.33, с. 25, рис. 112]	Рис. 1.1			Рис. 1.2		

Таблица 1.2

сатор

ПТФЭ при T, °С			ПП при T,°С				
40	60	80	20	40	60	80	100
70,4	70,4	90,5	70,4	70,4	70,4	64,0	63,32
$1{,}8\cdot10^{-4}$	$1{,}8\cdot10^{-4}$	$1{,}8\cdot10^{-4}$	$2{,}2\cdot10^{-4}$	$2{,}1\cdot10^{-4}$	$2{,}8\cdot10^{-4}$	$3{,}4\cdot10^{-4}$	$4{,}0\cdot10^{-4}$
89,6·10	89,6·10	99,5·10	$9{,}7\cdot10^{2}$	$8{,}1\cdot10^{2}$	$1{,}4\cdot10^{3}$	$1{,}3\cdot10^{3}$	$8{,}4\cdot10^{2}$
$1{,}7\cdot10^{-4}$	$1{,}7\cdot10^{-4}$	$1{,}5\cdot10^{-4}$	$1{,}5\cdot10^{-4}$	$1{,}4\cdot10^{-4}$	$1{,}4\cdot10^{-4}$	$1{,}3\cdot10^{-4}$	$1{,}3\cdot10^{-4}$
$15{,}2\cdot10^{3}$	$15{,}2\cdot10^{2}$	$11{,}8\cdot10^{3}$	$1{,}3\cdot10^{4}$	$1{,}2\cdot10^{4}$	$1{,}3\cdot10^{4}$	$1{,}4\cdot10^{4}$	$1{,}5\cdot10^{4}$
$1{,}5\cdot10^{-4}$	$4{,}9\cdot10^{-5}$	$1{,}4\cdot10^{-4}$	$1{,}0\cdot10^{-4}$	$1{,}6\cdot10^{-4}$	$1{,}7\cdot10^{-4}$	$2{,}2\cdot10^{-4}$	$3{,}2\cdot10^{-4}$
$37{,}0\cdot10^{3}$	$51{,}3\cdot10^{3}$	$65{,}9\cdot10^{3}$	$6{,}5\cdot10^{4}$	$7{,}1\cdot10^{4}$	$8{,}9\cdot10^{4}$	$6{,}5\cdot10^{4}$	$9{,}0\cdot10^{4}$
$4{,}9\cdot10^{-5}$	$1{,}6\cdot10^{-4}$	$9{,}1\cdot10^{-5}$	$3{,}5\cdot10^{-4}$	$4{,}5\cdot10^{-4}$	$6{,}7\cdot10^{-4}$	$6{,}3\cdot10^{-4}$	$7{,}6\cdot10^{-4}$
$16{,}7\cdot10^{5}$	$16{,}6\cdot10^{5}$	$12{,}4\cdot10^{5}$	$5{,}9\cdot10^{5}$	$5{,}9\cdot10^{5}$	$8{,}1\cdot10^{5}$	$5{,}9\cdot10^{5}$	$8{,}1\cdot10^{5}$
$8{,}0\cdot10^{-5}$	$7{,}5\cdot10^{-4}$	$4{,}6\cdot10^{-4}$	$1{,}6\cdot10^{-3}$	$1{,}7\cdot10^{-3}$	$1{,}8\cdot10^{-3}$	$2{,}0\cdot10^{-3}$	$2{,}4\cdot10^{-3}$
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
10	10	10	10	10	10	10	10
$1\cdot10^{5}$	$1\cdot10^{5}$	$1\cdot10^{5}$	$1\cdot10^{5}$	$1\cdot10^{5}$	$1\cdot10^{5}$	$1\cdot10^{5}$	$1\cdot10^{5}$
9,2	9,6	8,8	6,0	7,5	6,0	9,0	7,6

для кривой $\mathrm{tg}\delta_э(\omega)$

Рис. 1.3 | Рис. 1.4

мента, поэтому являются малопригодными для экспериментальной оптимизации;

4) применение поисковых методов для минимизации $\Phi_2(r)$ по всем переменным C_i^* и a_i $(i=1, ..., m)$ сопряжено со значительными трудностями из-за большого объема вычислений.

Для решения поставленной задачи был предложен комбинированный подход. Предварительно заметим, что при фиксированных значениях переменных a_i функционал $\Phi_2(r)$ является по C_i^* унимодальным и для определения оптимальных C_i достаточно решить систему из m линейных алгебраических уравнений:

$$\frac{\partial \Phi_2(r)}{\partial C_i^*} = 0 \quad (i = 1,2, ..., m). \qquad (1.2)$$

Итак, задав любой вектор $a^{(0)}=(a_1, a_2, ..., a_m)^{(0)}$, можно определить оптимальные C_i^*, решив систему (1.2). Для минимизации $\Phi_2(r)$ по a_i применим методы, использующие идею покоординатного поиска. Построим итерационный процесс по следующей схеме. Зададим некоторое начальное приближение $a^{(0)}=(a_1, ..., a_m)^{(0)}$, определим для него оптимальный вектор $C^{*(0)}=(C_1^*, ..., C_m^*)^{(0)}$ и вычислим значение $\Phi_2(r)$ в точке $r^{(0)}=(C_1^*, ..., C_m^*, a_1, ..., a_m)^{(0)}$.

Начнем варьировать поочередно каждую координату вектора $a^{(0)}$ с некоторым мультипликативным шагом $\rho>1$ и для каждой пробы оптимальные C_i^* определим из системы (1.2). На каждом шаге вместо $a_i^{(0)}$ вносится $a_i^{(0)}\rho$ или $a_i^{(0)}\cdot\rho^{-1}$, если это ведет к уменьшению значения функционала $\Phi_2(r)$. Одна итерация считается законченной, если просмотрены все координаты вектора $a^{(0)}$. Если в результате k-й итерации ни одно из значений $a_i^{(k)}$ не изменилось, то шаг варьирования делится на некоторое число $v>1$, и процесс итераций продолжается с новым шагом $\rho_1=\rho/v$. При достижении шагом варьирования некоторого заранее задан-

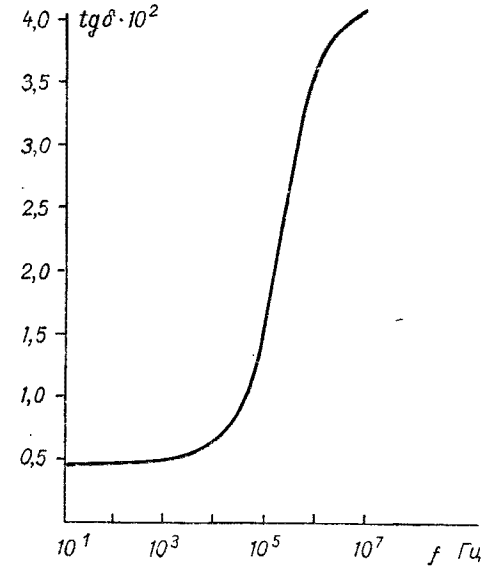


Рис. 1.1. Частотная зависимость tgδ конденсаторной бумаги (КОН-II), пропитанной неполярной жидкостью

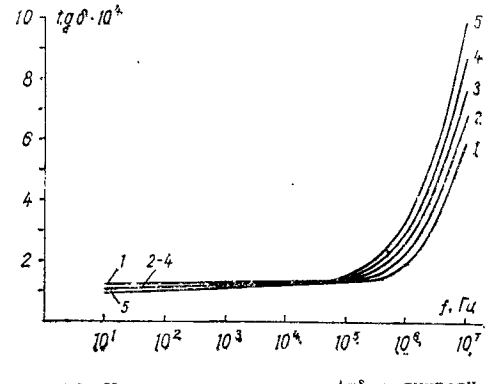


Рис. 1.2. Частотная зависимость tgδ полипропиленовой пленки при различных температурах. T, °С: *1*—23; *2*—10; *3*—60; *4*—80; *5*—100

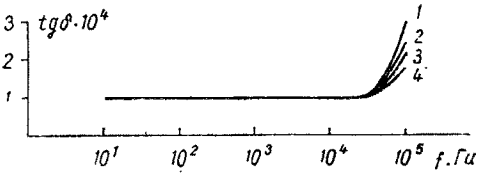


Рис. 1.3. Частотная зависимость tg δ фторопластового конденсатора при $U_н=1000$ В и $C_н=0,22$ мкФ в изоляционном корпусе с фольговыми обкладками при различных температурах. T, °С: *1*—20; *2*—40; *3*—60; *4*—80

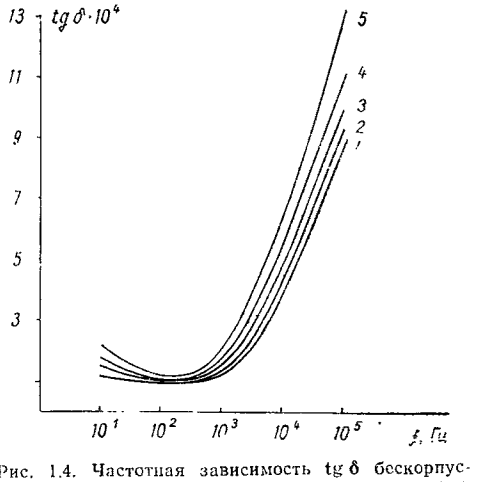


Рис. 1.4. Частотная зависимость tg δ бескорпусного непропитанного полипропиленового конденсатора при $U_н=1000$ В и $C_н=0,22$ мкФ с фольговыми обкладками при различных температурах. T, °С: *1*—20; *2*—40; *3*—60; *4*—80; *5*—100

ного числа ρ_{min} процесс итераций прекращается.

Так как по условию задачи нам нужно минимизировать функционал $\Phi_1(r)$, то процесс можно продолжить по той же схеме в сторону минимизации $\Phi_1(r)$. На каждом шаге оптимальные C_i^* также определяются из системы (1.2). Более целесообразным является ведение направленного поиска по a_i в сторону минимизации линейной комбинации данных функционалов $(1-\beta_k)\Phi_1(r^{(k)})+\beta_k\Phi_0(r^{(k)})$, меняя итерационный параметр β_k таким образом, чтобы вначале преобладал $\Phi_2(r)$, а в дальнейшем $\Phi_1(r)$. Для этого достаточно положить $\beta_k=1/k^3$, где k — номер итерации.

Заметим, что порядок просмотра координат a_i может быть произвольным и на основе этого можно предложить ряд вариантов организации поиска. Например, можно варьировать с мультипликативным шагом одну из координат вектора $a^{(0)}$ до тех пор, пока значение функционала не перестанет уменьшаться, а затем перейти к другой координате и т. д.

Предложенный метод обеспечивает достаточно хорошую сходимость к точке оптимума, однако приходится часто менять направление поиска, а следовательно, делать большое количество ненужных проб, прежде чем будет достигнут оптимум. Процесс поиска в ряде случаев может закончиться в точке локального минимума или крутого оврага, ибо нельзя продвинуться вниз по оврагу при поочередном движении только вдоль координатных осей.

Для ускорения поиска по a_i предлагается модификация метода конфигураций, лишенная отмеченных выше недостатков. Метод конфигураций позволяет двигаться по оврагу до оптимума и оптимизировать сам процесс поиска. Он основывается на том предположении, что направление поиска остается локально неизменным. Выберем в качестве первой базовой точки $a^{(0)}$ и при помощи поочередных пробных мультипликативных шагов по каждой координате определим вторую базовую точку $a^{(1)}$. Пара базовых точек $a^{(0)}$ и $a^{(1)}$ определяет первую конфигурацию. Отказываясь от пробных шагов вблизи $a^{(1)}$, продвигаемся в направлении вектора $a^{(0)}a^{(1)}$ сразу на двойную длину вектора $a^{(0)}a^{(1)}$. Это движение определяет новую точку $d_1=2a^{(1)}-a^{(0)}$. При помощи аналогичных пробных шагов в окрестности d_1 подкорректируем направление поиска и определим третью базовую точку $a^{(2)}$. Пара точек $a^{(1)}$ и $a^{(2)}$ определяет вторую конфигурацию, по которой поиск ведется аналогичным образом $d_2=2a^{(2)}-a^{(1)}$, и т. д.

Пусть в результате k-й конфигурации получена точка d_k, в которой критерий поиска хуже, чем в $a^{(k-1)}$ базовой точке, и при помощи пробных шагов его нельзя улучшить. Тогда конфигурация разрушается, и в этом случае $a^{(k)}\equiv a^{(k-1)}$. Уменьшая длину пробного шага и используя $a^{(k)}$ в качестве первой базовой точки, процесс поиска будем продолжать до тех пор, пока длина пробного шага не достигнет заранее заданной величины ρ_{min}. В ряде случаев, когда овраг нельзя обнаружить при помощи пробных шагов вдоль координатных осей, целесообразно воздействовать с помощью мультипликативного шага на все или на несколько координат одновременно.

Для проведения вычислительных экспериментов была составлена универсальная программа на языке ФОРТРАН, реализующая предложенный метод. Ввиду того, что задача является мультимодальной, в программе предусматривалось наличие генератора начальных приближений. Значительное сокращение времени поиска было достигнуто за счет оптимального выбора мультипликативного шага и введения некоторых ограничений. Например, процесс итераций прекращался, если $|\Phi_1(r^{(k)})-\Phi_1(r^{(k-1)})|<\varepsilon$, где ε задано. Если для полученных оптимальных значений C_i^* и a_i погрешность аппроксимации превышала допустимую (не более 10%), то происходило увеличение числа релаксаторов и программа возвращалась на повторный счет. Все вычисления проводились на ЭВМ ЕС-1022, на которой время расчета одного варианта составляет 2—3 мин.

В табл. 1.1 и 1.2 приведены значения оптимальных параметров схемы замещения соответственно конденсаторных диэлектриков и конденсаторов при различных температурах.

В табл. 1.1 и 1.2 приняты следующие сокращения: ПЭТФ—полиэтилентерефталат (лавсан); ПК—поликарбонат; ПСУ — полисульфон; ПС—полистирол; ПЭ—полиэтилен; С—совол; КОН-II—конденсаторная бумага; ПП—полипропилен; ПТФЭ—политетрафторэтилен (фторопласт-4).

Основные обозначения и распечатка программы на языке ФОРТРАН для определения параметров схемы замещения диэлектриков и конденсаторов по частотной зависимости $\mathrm{tg}\delta_э(\omega)$

N — число экспериментальных точек
M — число релаксаторов
W — массив элементов размером N, состоящий из значений частот ω_i
D — массив размером N, состоящий из значений функции $\mathrm{tg}\delta_э(\omega)$
A, B, S, Z, X, Y — массивы размером M, используемые для вычисления и хранения компонент вектора $a=(a_1, \ldots, a_m)$
G — массив размером $M\times(M+1)$, состоящий из элементов матрицы системы линейных уравнений
H — мультипликативный шаг
T — относительное отклонение в узлах аппроксимации
T2 — погрешность аппроксимации в равномерной или квадратичной метриках.

Примечание. SFINX — подпрограмма, предназначенная для решения системы линейных алгебраических уравнений. Мультипликативный шаг p для узлов аппроксимации в частотном диапазоне задается равным 1,467797. На печать выда-

ются значения частот ω_j, функции $\mathrm{tg}\delta_э(\omega_j)$, параметры схемы замещения C_i^*, a_i и погрешность Δ.

```
      DIMENSION A(5), B(5),
     *S(5), Z(5), X(5),
     *Y(5), W(25), D(25),
     1C(5,25), G(5,6)
      INTEGER V, R, R1
  100 FORMAT (10F5·3)
  101 FORMAT (5X, 'ОТНОСИТЕЛЬ
     *НАЯ ПОГРЕШНОСТЬ=', F10·5)
  102 FORMAT (2X, 'ВРЕМЯ=',
     *8E10·3)
  103 FORMAT (2X, 'ЕМКОСТИ=',
     *8E10·3)
  104 FORMAT (2X, 'TG=',
     *E10·3,2X,'W=',E10·3)
      CALL FTNSPM (0)
      M=5
      N=25
      W(1)=62.83
      DO 1 I=2,N
    1 W(I)=W(I—1)*1,467797
      READ (1,100) D
      DO 15 I=1, N
   15 WRITE (3,104) D(I), W(I)
      A(1)=300.
      A(2)=A(1)*10.
      A(3)=A(2)*10.
      A(4)=A(3)*10.
      A(5)=A(4)*10.
      DO 2 J=1,M
      B(J)=A(J)
    2 S(J)=A(J)
      H=0.1
      T2=100.
    3 R=0
      DO 4 L=1,M
      R1=1
      IF(L.GT.1) R1=2
      DO 5 V=1,3, R1
      A(L)=B(L)*(1+H)**(2—V)
      DO 6 J=1,M
      DO 6 I=1,N
      C(J,I)=1./(W(I)/A(J)+
     *A(J)/W(I))
    6 CONTINUE
      DO 7 J=1,M
      G(J,M+1)=0.
      DO 7 I=1,N
    7 G(J, M+1)=G(J,M+1)+
     *C(J, I)
      DO 8 K=1,M
      DO 8 J=1,M
      G(K,J)=0.
      DO 8 I=1,N
    8 G(K,J)=G(K,J)+C(K,I)*
     *C(J,I)/D(I)
      CALL SFINX (G,M,X)
      T1=0.
      DO 9 I=1,N
      T=0.
      DO 19 J=1,M
   19 T=T+C(J,I)*X(J)
      T=1.—T/D(I)
      IF(H—0.08) 20,20,21
   20 IF(ABS(T).GT.T1)
     *T1=ABS(T)
      GOTO 9
   21 T1=T1+T*T
    9 CONTINUE
      IF (T1.GT.T2) GOTO 5
      T2=T1
      B(L)=A(L)
      R=1
      DO 11 J=1,M
      Y(J)=X(J)
   11 Z(J)=A(J)
      GOTO 4
    5 CONTINUE
      A(L)=B(L)
    4 CONTINUE
      DO 13 J=1,M
      B(J)=2.*Z(J)—S(J)
   13 S(J)=Z(J)
      IF(R.GT.0) GOTO 3
      T2=100.
      H=H/10.
      WRITE(3,102) Z
      WRITE(3,103) Y
      WRITE(3,101) T1
      IF(H.GT.0.008) GOTO 3
      END
```

Определение параметров схемы замещения конденсаторов по функции спада тока $i(t)$. Для заданной временной зависимости $i(t)$ $(t_{\min} \leqslant t \leqslant t_{\max})$ требуется построить аппроксимирующую модельную функцию $i_M(t)$, имеющую вид

$$i(t) = \sum_{i=1}^{m} C_i^* \, e^{-a_i t}.$$

Параметры $\tau_i = \dfrac{1}{a_i}$, $R_i = \dfrac{\tau_i}{C_i^* C_0}$ $(i=1,\ldots, m)$ означают постоянные времени и сопротивления релаксаторов.

На временном интервале $(t_{\min}, t_{\max})$ выберем множество логарифмически равномерно распределенных узлов t_j $(j=1, 2, \ldots, n)$, которые определяются следующим образом:

$$t_1 = t_{\min},\ t_j = p t_{j-1}\ (j=2, \ldots, n),$$

где $t_n = t_{\max}$, $p > 1$. Обозначим через $\Delta = \max\limits_{1 \leqslant j \leqslant n} \left| 1 - \dfrac{i_M(t_j)}{i(t_j)} \right|$ относительную погрешность аппроксимации. Задача состоит в определении оптимальных значений C_i^* и a_i, при которых Δ достигает минимума. Таким образом ищется минимум функционала

$$J_1\left(C_i^*, a_i\right) = \max_{1 \leqslant j \leqslant n} \left| 1 - \frac{\sum\limits_{i=1}^{m} C_i^* e^{-a_i t_j}}{i(t_j)} \right|,$$

зависящего от $2m$ параметров C_i^* и a_i.

Для определения минимума $I_1(C_i^*, a_i)$ рассмотрим вспомогательный функционал

$$J_2\left(C_i^*, a_i\right) = \sum_{j=1}^{n} \left(1 - \frac{\sum\limits_{i=1}^{m} C_i^* e^{-a_i t_j}}{i(t_j)} \right)^2,$$

характеризующий относительное квадратичное отклонение $i_M(t)$ от $i(t)$ в узлах аппроксимации. Расстояние между точками оптимума $I_1(C_i^*, a_i)$ и $I_2(C_i^*, a_i)$ стремится к нулю при $m \to \infty$. При фиксированных m эти точки довольно близки, поэтому можно вначале оптимизировать $I_2(C_i^*, a_i)$, чтобы выйти в малую окрестность точки оптимума $I_1(C_i^*, a_i)$, а уже затем продолжить минимизацию $I_1(C_i^*, a_i)$.

При фиксированных a_i оптимальные для $I_2(C_i^*, a_i)$ значения параметров C_i^* определяются однозначно из системы линейных алгебраических уравнений

$$\frac{\partial J_2(C_i^* a_i)}{\partial C_i^*} = 0 \ (i=1, 2, \ldots, m). \quad (2.1)$$

Для минимизации $I_2(C_i^*, a_i)$ по a_i используется модифицированный вариант метода конфигураций с мультипликативным шагом. Зададим некоторое начальное приближение $a^{(0)}=(a_1, \ldots, a_m)^{(0)}$ и определим для него оптимальный вектор $C^{*(0)}=(C_1^*, \ldots, C_m^*)^{(0)}$ из системы (2.1). Из этого приближения, которое выбирается логарифмически равномерным, предварительно организуется связанный поиск в сторону минимизации $I_2(C_i^*, a_i)$. Начнем варьировать одновременно все координаты вектора $a^{(0)}$ с некоторым шагом $\rho>1$ и для каждой пробы оптимальные C_i^* определяем из системы (2.1). На каждом шаге вместо $a^{(0)}$ вносится $a^{(0)}\rho$ или $a^{(0)}\rho^{-1}$, если это ведет к уменьшению значения функционала $I_2(C_i^*, a_i)$. Если в результате k-й итерации вектор $a^{(k)}$ не изменился, то шаг варьирования делится на некоторое число $v>1$ и процесс продолжается с новым шагом $\rho_1=\rho/v$. При достижении шагом варьирования некоторого заданного числа ρ_{min} связанный поиск прекращается. Функционал $I_2(C_i^*, a_i)$ имеет весьма сложную структуру, которая характеризуется наличием локальных экстремумов и, как показали вычислительные эксперименты, лишь связанный поиск, организованный по изложенной выше схеме, может привести в окрестность глобального оптимума для $I_2(C_i^*, a_i)$. В дальнейшем, исходя из полученных значений C_i^* и a_i, оптимизируется линейная комбинация

$$\beta_k I_2(C_i^*, a_i) + (1-\beta_k) I_1(C_i^*, a_i)$$
при $\beta_k \to 0$.

Схема поискового процесса аналогична модифицированному варианту метода конфигураций, изложенному достаточно подробно в § 1 настоящего приложения.

Для численной реализации алгоритма составлена универсальная программа на языке ФОРТРАН-IV. Эффективность метода исследовалась на модельной задаче. Оптимальные значения параметров схемы замещения для функции спада тока $i(t)$, изображенной на рис. 1.5, приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Параметр	Его значение	Параметр	Его значение
a_1	1,005	C_3^*	0,0097
C_1^*	0,9992	t_{min},с	10^{-1}
a_2	0,1005	t_{max},с	10^3
C_2^*	0,1019	Δ, %	7,3
a_3	0,01005		

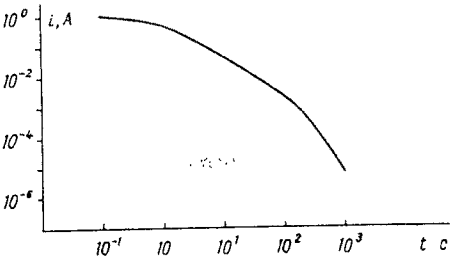


Рис. 1.5. Функция спада тока конденсатора i при единичном скачке напряжения

Основные обозначения и распечатка программы на языке ФОРТРАН для определения параметров схемы замещения конденсаторов по функции спада тока $i(t)$

N — число точек на кривой $i(t)$

M — число релаксаторов в схеме замещения

W — массив элементов размером N, состоящий из значений t_j

D — массив размером N, состоящий из значений функции $i(t_j)$

A, B, S, Z, Y, X — массивы размером M, используемые для вычисления и хранения компонент вектора $a=(a_1, \ldots, a_m)$

G — массив размером $M\times(M+1)$, состоящий из элементов матрицы системы линейных уравнений

H — мультипликативный шаг

T — относительное отклонение в узлах аппроксимации

T2 — погрешность аппроксимации в равномерной или квадратичной метриках

Примечание. SFINX — подпрограмма, предназначенная для решения системы линейных алгебраических уравнений. Мультипликативный шаг p для узлов аппроксимации во временном диапазоне задается равным 1,467797. На печать выдаются значения t_j и функции $i(t_j)$, параметры схемы замещения C_i^*, a_i и погрешность аппроксимации Δ.

```
      DIMENSION A(7), B(7),
     *S(7), Z(7), X(7), Y(7),
     *W(49), D(49), C(7,49),
     *G(7,8)
      INTEGER V,R,R1
```

```
100  FORMAT (10F5.3)
101  FORMAT(5X, 'ОТНОСИТЕЛЬ
     *НАЯ ПОГРЕШНОСТЬ=' F10.5)
102  FORMAT (2X, 'ВРЕМЯ=',
     *8E10.3)
103  FORMAT 2X, 'ЕМКОСТИ=',
     *8E10.3)
104  FORMAT (2X, 'TG=', E10.3,
     *2X, 'W=', E10.3)
     CALL FTNSPM(0)
     N=43
     M=7
     W(1)=1E—2
     DO 1 I=2,N
  1  W(I)=W(I—1)*1.467797
     X(1)=0.011
     X(2)=0.0147
     X(3)=0.0315
     X(4)=0.059
     X(5)=0.103
     X(6)=0.215
     X(7)=0.5658
     A(1)=1./0.099
     A(2)=1./0.984
     A(3)=1./9.68
     A(4)=1./94.
     A(5)=1./882.
     A(6)=1./7191.
     (A(7)=1E—5
     DO 12 I=1,N
     D(I)=0.
     DO 12 J=1,M
 12  D(I)=D(I)+X(J)*
     *EXP(—A(J)*W(I))
     DO 15 I=1,N
 15  WRITE (3,104) D(I),W(I)
     A(6)=A(7)*10.
     A(5)=A(6)*10.
     A(4)=A(5)*10.
     A(3)=A(4)*10.
     A(2)=A(3)*10.
     A(1)=A(2)*10.
     DO 2 J=1,M
     B(J)=A(J)
  2  S(J)=A(J)
     H=0.1
     T2=100.
  3  R=0.
     MM=M—1
     DO 4 L=1,MM
     R1=1
     IF(L.GT.1) R1=2
     DO 5 V=1,3,R1
     A(L)=B(L)*(1+H)**(2—V)
     DO 6 J=1,M
     DO 6 I=1,N
     C(J,I)=EXP(—A(J)*W(I))
  6  CONTINUE
     DO 7 J=1,M
     G(J,M+1)=0.
     DO7 I=1,N
  7  G(J,M+1)=G(J,M+1)+
     *C(J,I)
     DO 8 K=1,M
     DO 8 J=1,M
     G(K,J)=0.
     DO 8 I=1,N
  8  G(K,J)=G(K,J)+C(K,I)*
     *C(J,I)/D(I)
     CALL SFINX(G,M,X)
     T1=0.
     DO 9 I=1,N
     T=0.
     DO 19 J=1,M
 19  T=T+C(J,I)*X(J)
     T=1.—T/D(I)
     IF(H—0.08) 20,20,21
 20  IF(ABS(T).GT.T1)
     *T1=ABS(T)
     GOTO 9
 21  T1=T1+T*T
  9  CONTINUE
     IF(T1.GT.T2) GOTO 5
     T2=T1
     B(L)=A(L)
     R=1
     DO 11 J=1,M
     Y(J)=X(J)
 11  Z(J)=A(J)
     GOTO 4
  5  CONTINUE
     A(L)=B(L)
  4  CONTINUE
     DO 13 J=1,M
     B(J)=2.*Z(J)—S(J)
 13  S(J)=Z(J)
     IF(R.GT.0) GOTO 3
     T2=100.
     H=H/10.
     WRITE(3,102) Z
     WRITE(3,103) Y
     WRITE(3,101) T1
     IF(H.GT.0.008) GOTO 3
     CO=1E—6
     X(1)=CO*Y(1)/(1.—Y(1))
     A(1)=1./(X(1)*Z(1))
     X(2)=CO*Y(2)/((1.Y(1)—
     *Y(2))*(1.—Y(1)))
     A(2)=1./(X(2)*Z(2))
     X(3)=CO*Y(3)/((1.—Y(1)—
     *Y(2)—Y(3))*(1.—Y(1)—Y(2)))
     A(3)=1./(X(3)*Z(3))
     X(4)=CO*Y(4)/((1.—Y(1)—
     *Y(2)—Y(3)—Y(4))*(1.—
     *Y(1)—Y(2)—Y(3)))
     A(4)=1./(X(4)*Z(4))
     X(5)=CO*Y(5)/((1.—Y(1)—
     *Y(2)—Y(3)—Y(4)—Y(5))*(1.
     *—Y(1)—Y(2)—Y(3)—Y(4)))
     A(5)=1./(X(5)*Z(5))
     X(6)=CO*Y(6)/((1.—Y(1)—
     *Y(2)—Y(3)—Y(4)—Y(5)—Y(6))*
     *6(1.—Y(1)—Y(2)—Y(3)—
     *Y(4)—Y(5)))
     A(6)=1./(X(6)*Z(6))
     A(M)=Y(M)/(CO*A(M))
     WRITE(3,103) X
     WRITE(3,102) A
     END
```

Определение параметров схемы замещения конденсаторов по частотной зависимости $C(\omega)$ и $g(\omega)$. Задача состоит в построении модельной функции, аппроксимирующей с заданной точностью на частотном диапазоне (ω_{min}, ω_{max}) экспериментальную частотную зависимость $\mathrm{tg}\delta(\omega)$. Аппроксимирующая функция имеет вид

$$\mathrm{tg}\,\delta_M(\omega) = \frac{g_M(\omega)}{\omega C_M(\omega)},$$

где

$$g_M(\omega) = \sum_{i=1}^{m} \frac{(\omega/a_i)^2 C_i^* a_i}{1 + \left(\frac{\omega}{a_i}\right)^2};$$

$$C_M(\omega) = \sum_{i=1}^{m} \frac{C_i^*}{1+\left(\frac{\omega}{a_i}\right)^2}.$$

Параметры $\tau_i = \frac{1}{a_i}$ и $R_i = \frac{\tau_i}{C_i^* C_0}$ ($i=1, 2, \ldots, m$) означают времена релаксации и сопротивления релаксаторов.

Выберем на диапазоне $(\omega_{min}, \omega_{max})$ логарифмически равномерно распределенные узлы аппроксимации $\omega_1=\omega_{min}$, $\omega_j = p\omega_{j-1}$ ($j=2, \ldots, n$), где $p>1$, $\omega_n=\omega_{max}$. Параметры C_i^* и a_i необходимо определить из условия минимума максимального относительного отклонения в узлах аппроксимации модельной функции от исходной

$$\Delta = \max_{1\leqslant j\leqslant n}\left|1-\frac{\mathrm{tg}\,\delta_M(\omega_j)}{\mathrm{tg}\,\delta_э(\omega_j)}\right| \to \min.$$

Поставленная задача, по существу, эквивалентна оптимизации функционала

$$F_1\left(C_i^*, a_i\right) = \max_{1\leqslant j\leqslant n}\left(\left|1-\frac{g_M(\omega_j)}{g_э(\omega_j)}\right| + \left|1-\frac{C_M(\omega_j)}{C_э(\omega_j)}\right|\right),$$

зависящего от 2 m параметров C_i^* и a_i.

Для минимизации $F_1(C_i^*, a_i)$ введем в рассмотрение квадратичный функционал

$$F_2\left(C_i^*, a_i\right) = \sum_{j=1}^{n}\left[\left(1-\frac{g_M(\omega_j)}{g(\omega_j)}\right)^2 + \left(1-\frac{C_M(\omega_j)}{C_э(\omega_j)}\right)^2\right],$$

характеризующий относительное квадратичное отклонение $\mathrm{tg}\delta_M(\omega)$ от $\mathrm{tg}\delta_э(\omega)$. Расстояние между точками оптимума $F_1(C_i^*, a_i)$ и $F_2(C_i^*, a_i)$ стремится к нулю при $m\to\infty$. В случае фиксированных m эти точки довольно близки, поэтому целесообразно вначале оптимизировать $F_2(C_i^*, a_i)$, чтобы выйти в малую окрестность точки оптимума $F_1(C_i^*, a_i)$, а затем продолжить минимизацию $F_1(C_i^*, a_i)$.

При фиксированных a_i оптимальные для $F_2(C_i^*, a_i)$ значения параметров C_i^* определяются из системы линейных алгебраических уравнений

$$\frac{\partial F_2\left(C_i^*, a_i\right)}{\partial C_i^*} = 0 \ (i=1, 2, \ldots, m).$$

Схема поискового процесса по параметрам a_i, которые нелинейно входят в функционал $F_2(C_i^*, a_i)$, аналогична модифицированному методу конфигураций, описанному в § 1 и 2.

Таблица 1.4

Параметр	Модельные кривые $C(\omega)$ и $g(\omega)$	Экспериментальные зависимости $C(\omega)$ и $g(\omega)$ для конденсатора К52-2-25В-200мкФ при $T_0=25°C$
a_1	$1{,}24\cdot10^3$	$6{,}46\cdot10^2$
C_1^*	$2{,}03\cdot10^{-5}$	$4{,}0\cdot10^{-6}$
a_2	$1{,}36\cdot10^4$	$5{,}03\cdot10^3$
C_2^*	$1{,}01\cdot10^{-5}$	$1{,}4\cdot10^{-4}$
a_3	$6{,}41\cdot10^4$	$3{,}09\cdot10^4$
C_3^*	$9{,}64\cdot10^{-6}$	$4{,}8\cdot10^{-5}$
a_4	$3{,}77\cdot10^5$	$3{,}34\cdot10^5$
C_4^*	$1{,}90\cdot10^{-4}$	$1{,}4\cdot10^{-5}$
Диапазон частот, Гц		
f_{min}	$1\cdot10^2$	$1\cdot10^2$
f_{max}	$1\cdot10^5$	$1\cdot10^5$
Δ, %	2,3	10,0

Численная реализация задачи осуществлялась на ЭВМ ЕС 1022 с помощью универсальной программы на языке ФОРТРАН-IV.

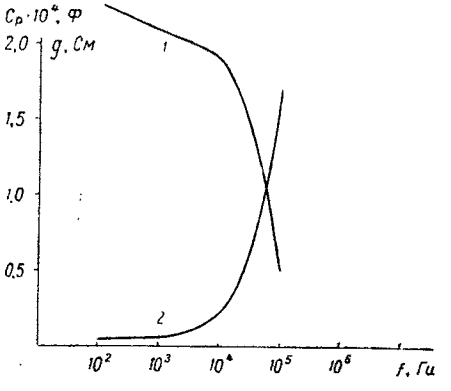


Рис. 1.6. Частотные зависимости емкости (кривая *1*) и активной проводимости (кривая *2*) модели оксидно-электролитического конденсатора

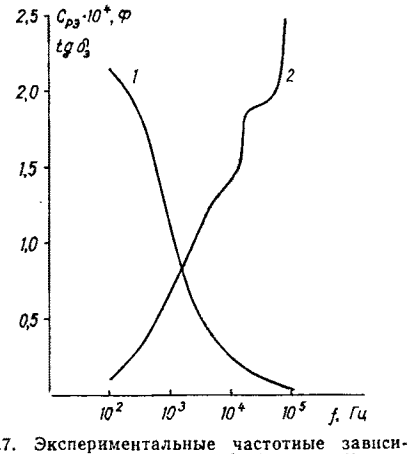


Рис. 1.7. Экспериментальные частотные зависимости $C_{рэ}$ (кривая *1*) и $\mathrm{tg}\,\delta$ (кривая *2*) для конденсаторов К52-2-25В-200 мкФ при $T_0=25°C$ ($g_э=\omega C_{рэ}\mathrm{tg}\,\delta_э$)

В табл. 1.4 приведены оптимальные параметры a_i и C_i^* для частотных зависимостей $C(\omega)$ и $g(\omega)$, изображенных на рис. 1.6 и 1.7.

Основные обозначения и распечатка программы на языке ФОРТРАН для определения параметров схемы замещения конденсаторов по частотным зависимостям $C(\omega)$ и $g(\omega)$

N — число узлов аппроксимации

M — число релаксаторов

W — массив элементов размером N, состоящий из значений ω_j

D — массив размером N, состоящий из значений функции $C(\omega_j)$

P — массив размером N, состоящий из значений функции $g(\omega_j)$

A, B, S, Z, X, Y — массивы размером M, используемые для вычисления и хранения вектора $a=(a_1, \ldots, a_m)$

G — массив размером $M\times(M+1)$, состоящий из элементов матрицы линейных уравнений

H — мультипликативный шаг

T — относительное отклонение в узлах аппроксимации

T2 — погрешность аппроксимации по равномерной или квадратичной метрикам

Примечание. SFINX — подпрограмма, предназначенная для решения системы линейных алгебраических уравнений. Мультипликативный шаг p в частотном диапазоне задается равным 1,467797. На печать выдаются значения ω_j, функции $C(\omega_j)$ и $g(\omega_j)$, параметры схемы замещения C_i^*, a_i и погрешность аппроксимации Λ.

```
      DIMENSION A(4), B(4),
     *S(4),Z(4),X(4),Y(4),
     *W(19),D(19),C(4,19),
     *G(4,5),P(19),F(4,19)
  102 FORMAT(2X, 'ЧАСТОТЫ=',
     *8E10.3)
  101 FORMAT(5X, 'ОТНОСИТЕЛЬ
     *НАЯ ПОГРЕШНОСТЬ=', F10.5)
  100 FORMAT(10F5.3)
      INTEGER V,R,R1
  104 FORMAT(2X, 'TG=',
     *E10.3,2X, 'W=', E10.3)
  103 FORMAT(2X, 'ЁМКОСТИ=',
     *8F10.3)
      M=4
      W(1)=628.3
      N=19
      DO 1 I=2,N
    1 W(I)=W(I—1)*1.467797
      A(1)=208.*6.28
      A(2)=1000.*6.28
      A(3)=10000.*6.28
      A(4)=628000.
      X(1)=60.E—6
      X(3)=25.E—6
      X(2)=150.E—6
      X(4)=6.E—6
      DO 33 I=1,N
      T=0.
      T1=0.
      DO 30 J=1,M
      T=T+X(J)/(1.+
     *(W(I)/A(J))**2)
   30 T1—T1+(W(I)/A(J))**2/
     *(1.+(W(I)/A(J))**2)*
     *X(J)*A(J)
      P(1)=T1
      D(1)=T
      T1=T1/(W(1)*T)
      WRITE(3,104) T1,W(1)
      CS=T*(1.+T1**2)
      WRITE(3,104) T1,W(1)
      RS=T1/(W(1)*CS)
      WRITE(3,104) CS, W(1)
      WRITE(3,104), RS,W(1)
   33 CONTINUE
      A(3)=A(2)*10.
      A(4)=A(3)*10.
      DO 2 J=1,M
      A(2)=A(1)*10.
      B(J)=A(J)
    2 S(J)=A(J)
      H=0.1
      T2=100.
    3 R=0.
      DO 4 L=1,M
      R1=1
      IF(L.GT.1) R1=2
      DO 5 V=1,3, R1
      A(L)=B(L)*(1+H)**(2—V)
      DO 6 J=1,M
      DO 6 I=1,N
      C(J,I)=1./(1.+(W(I)/
     *A(J)**2)
      F(J,I)=C(J,I)*
     *W(I)**2/A(J)
    6 CONTINUE
      DO 7 J=1,M
      G(J,M+1)=0.
      DO 7 I=1,N
    7 G(J,M+1)=G(J,M+1)+
     *G(J,I)/D(I)+F(J,I)/P(I)
      DO 8 K=1,M
      DO 8 J=1,M
      G(K,J)=0.
      DO 8 I=1,N
    8 G(K,J)=G(K,J)+C(K,I)*
     *C(J,I)/D(I)**2+F(K,I)*
     *F(J,I)/P(I)**2
      CALL SFINX(G,M,X)
      T1=0.
      DO 9 I=1,N
      TT=0.
      T=0.
      DO 19 J=1,M
      TT=TT+F(J,I)*X(J)
   19 T=T+C(J,I)*X(J)
      T=ABS(1.—T/D(I))+
     *ABS(1.—TT/P(I))
      IF(H—0,08)20,20,21
   20 IF(ABS(T).GT.T1)
     *T1=ABS(T)
      GOTO 9
   21 T1=T1+T*T
    9 CONTINUE
      IF(T1.GT.T2) GOTO 5
      T2=T1
      B(L)=A(L)
      R=1
      DO 11 J=1,M
      Y(J)=X(J)
   11 Z(J)=A(J)
      GOTO 4
    5 CONTINUE
      A(L)=B(L)
    4 CONTINUE
      DO 13 J=1,M
      B(J)=2.*Z(J)—S(J)
```

Таблица 1.5

Параметр	Конденсатор								
	К73-16-250В-0,1мкФ	К73-15-630В-0,15мкФ	К77-1-400В-0,1мкФ	К40У-9-200В-1,0мкФ*	К40У-9-200В-1,0мкФ	К75-12-400В-0,1мкФ	К75-12-630В-0,1мкФ	К75-12-1600В-0,1мкФ	К75-24-400В-0,1мкФ
p_1	$2{,}38\cdot10^{-5}$	$7{,}47\cdot10^{-6}$	$2{,}24\cdot10^{-6}$	$1{,}02\cdot10^{-3}$	$4{,}27\cdot10^{-3}$	$4{,}42\cdot10^{-4}$	$2{,}49\cdot10^{-4}$	$1{,}59\cdot10^{-4}$	$3{,}63\cdot10^{-4}$
B_1	0,134	0,339	0,165	0,302	0,392	0,227	0,126	0,157	0,252
p_2	$8{,}08\cdot10^{-7}$	$8{,}91\cdot10^{-7}$	$1{,}64\cdot10^{-7}$	$1{,}19\cdot10^{-4}$	$3{,}0\cdot10^{-4}$	$1{,}19\cdot10^{-5}$	$1{,}47\cdot10^{-5}$	$9{,}55\cdot10^{-7}$	$1{,}73\cdot10^{-5}$
B_2	0,838	0,662	0,827	0,250	0,283	0,225	0,073	0,777	0,318
p_3	—	—	—	$4{,}59\cdot10^{-6}$	$2{,}1\cdot10^{-5}$	$1{,}68\cdot10^{-7}$	$4{,}70\cdot10^{-7}$	—	$2{,}00\cdot10^{-7}$
B_3	—	—	—	0,427	0,292	0,515	0,774	—	0,270
Временной диапазон, мин									
t_{min}	$1\cdot10^3$	$1\cdot10^3$	$1\cdot10^3$	31,6	14,7	21,5·10	21,5·10	$1\cdot10^3$	$1\cdot10^2$
t_{max}	$1\cdot10^6$	$1\cdot10^6$	$1\cdot10^6$	$1\cdot10^5$	$31{,}6\cdot10^3$	$1\cdot10^6$	$1\cdot10^6$	$1\cdot10^6$	$1\cdot10^6$
Δ_t, %	1,5	3,8	0,6	1,6	1,9	4,9	0,8	5,0	2,9

* T=40°С

Таблица 1.6

Параметр	Конденсатор								
	К73-16-250В-0,1мкФ	К73-15-630В-0,15мкФ	К77-1-4-100В-0,1мкФ	К40У-9-200В-0,1мкФ	К40У-9-200В-0,1мкФ*	К75-12-400В-0,1мкФ	К75-12-630В-0,1мкФ	К75-12-1600В-0,1мкФ	К75-24-400В-0,1мкФ
R_1	$1{,}63\cdot10^{14}$	$1{,}04\cdot10^{14}$	$1{,}25\cdot10^{15}$	$1{,}36\cdot10^{11}$	$2{,}18\cdot10^{10}$	$4{,}62\cdot10^{12}$	$2{,}67\cdot10^{13}$	$2{,}02\cdot10^{13}$	$1{,}22\cdot10^{11}$
C_1	$0{,}154\cdot10^{-7}$	$0{,}769\cdot10^{-7}$	$0{,}198\cdot10^{-7}$	$0{,}432\cdot10^{-6}$	$0{,}664\cdot10^{-6}$	$0{,}204\cdot10^{-7}$	$0{,}144\cdot10^{-7}$	$0{,}186\cdot10^{-7}$	$0{,}337\cdot10^{-7}$
R_2	—	—	—	$1{,}65\cdot10^{11}$	$9{,}51\cdot10^{13}$	$9{,}51\cdot10^{13}$	$4{,}15\cdot10^{15}$	—	$3{,}2\cdot10^{13}$
C_2	—	—	—	$1{,}21\cdot10^{-6}$	$0{,}53\cdot10^{-7}$	$5{,}3\cdot10^{-8}$	$0{,}983\cdot10^{-8}$	—	$1{,}08\cdot10^{-7}$
R_y	$6{,}23\cdot10^{14}$	$6{,}69\cdot10^{14}$	$3{,}02\cdot10^{15}$	$5{,}58\cdot10^{12}$	$1{,}84\cdot10^{15}$	$1{,}84\cdot10^{15}$	$9{,}88\cdot10^{14}$	$4{,}88\cdot10^{14}$	$8{,}1\cdot10^{14}$

* T=40°С

```
13  S(J)=Z(J)
    IF(R.GT.0) GOTO 3
    T2=100.
    H=H/10.
    IF(H.GT.0.008) GOTO 3
    WRITE(3,102) Z
    WRITE(3,103) Y
    WRITE(3,101) T1
    DO 44 I=1,N
    T=0.
    T1=0.
    DO 40 J=1,M
    T=T+Y(J)/(1.+(W(I)/
   *Z(J))**2)
40  T1=T1+(W(I)/Z(J)**2/
   *(1.+(W(I)/Z(J))**2)*
   *Y(J)*Z(J)
    WRITE(3,104), T,W(I)
    T1=T1/(W(I)*T)
    WRITE(3,104), T1, W(I)
    CS=T*(1.+T1**2)
    RS=T1/(W(I)*CS)
    WRITE(3,104) CS, W(I)
    WRITE(3,104) RS, W(I)
44  CONTINUE
    END
```

Определение параметров схемы замещения конденсаторов по функциям саморазряда и самовосстановления напряжения. Определение параметров схемы замещения конденсаторов по функции саморазряда $u_c(t)/U_{зар}$ сводится к построению аппрок-

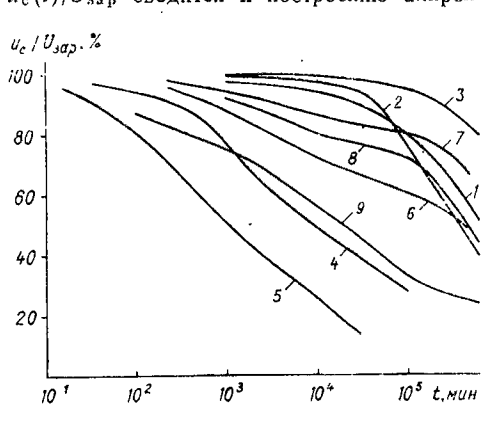


Рис. 1.8. Экспериментальные зависимости функции саморазряда $U(t)/U_{зар}$ различных конденсаторов при 20°С: *1* — К73-16-250В-0,1 мкФ; *2* — К73-15-630В-0,15 мкФ; *3* — К77-1-400В-0,1 мкФ; *4* — К40У-9-200В-0,1 мкФ; *5* — К40У-9-200В-0,1 мкФ; *6* — К-75-12-400В-0,1 мкФ; *7* — К75-12-630В-0,1 мкФ; *8* — К75-12-1600В-0,1 мкФ; *9* — К75-24-400В-0,1 мкФ

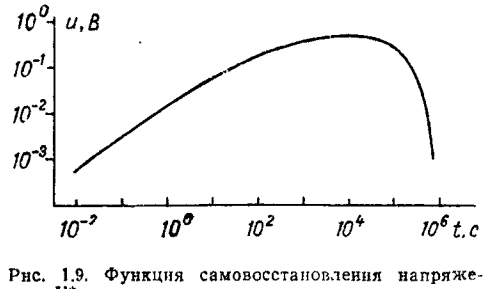


Рис. 1.9. Функция самовосстановления напряжения U^*

Таблица 1.7

Параметр	Его значение	Параметр	Его значение
Θ_1	10,1	A_5	0,21
A_1	$5{,}03\cdot10^{-3}$	Θ_6	$8{,}35\cdot10^{-5}$
Θ_2	1,06	A_6	0,377
A_2	$8{,}58\cdot10^{-3}$	Θ_7	$1{,}46\cdot10^{-5}$
Θ_3	0,121	A_7	−0,644
A_3	$4{,}48\cdot10^{-2}$	t_{min}, с	10^{-2}
Θ_4	$1{,}24\cdot10^{-2}$	t_{max}, с	10^6
A_4	$9{,}48\cdot10^{-2}$	Δ, %	0,96
Θ_5	$1{,}12\cdot10^{-3}$		

симирующей функции, вид которой совпадает с таковой для функции спада тока

$$\varphi(t)=\sum_{i=1}^{m} B_i e^{-p_i t} .$$

Следовательно, для нахождения оптимальных параметров B_i и p_i может быть использована программа, текст которой приведен в § 2 настоящего приложения.

В табл. 1.5 даны значения коэффициентов B_i, p_i, а в табл. 1.6 — параметры схемы замещения R_i(Ом), R_y(Ом), C_i(Ф) для экспериментальных функций саморазряда некоторых конденсаторов при $T=$ $=20$°С (рис. 1.8).

Для определения параметров схемы замещения конденсаторов по функции самовосстановления $u^*(t)$ необходимо построить аппроксимирующую функцию вида

$$f(t)=\sum_{i=1}^{m}\left(1-A_i e^{-\Theta_i t}\right),$$

где

$$A_m=-\sum_{i=1}^{m-1} A_i.$$

В этом случае метод нахождения оптимальных параметров, по существу, также не отличается от алгоритма, изложенного в § 2.

В табл. 1.7 приведены значения параметров схемы замещения для функции самовосстановления, график которой показан на рис. 1.9.

Основные обозначения и распечатка программы на языке ФОРТРАН для определения параметров схемы замещения конденсаторов по функции самовосстановления $u^*(t)$

N — число узлов аппроксимации

M — число релаксаторов

W — массив элементов размером N, состоящий из значений t_j

D — массив размером N, состоящий из значений функции $u^*(t_j)$

A, B, S, Z, X, Y — массивы размером M, используемые для вычисления и хранения вектора $a=(a_1, ..., a_m)$

G — массив размером M×(M+1), состоящий из элементов матрицы системы линейных уравнений

H — мультипликативный шаг

T — относительное отклонение в узлах аппроксимации

T2 — погрешность аппроксимации по равномерной или квадратичной метрикам

Примечание. SFINX — подпрограмма, предназначенная для решения системы линейных алгебраических уравнений. Мультипликативный шаг p для узлов аппроксимации во временном диапазоне задается равным 1,467797. На печать выдаются значения t_j, функции $u^*(t_j)$, параметры схемы замещения C_i^*, a_i и погрешность аппроксимации Δ.

```
      DIMENSION A(7), B(7),
     *S(7), Z(7), X(7), W(49),
     *D(49),C(7,49),G(7,8)
      INTEGER V,R,R1
  100 FORMAT(10F5.3)
  101 FORMAT(5X, 'ОТНОСИТЕЛЬ
     *НАЯ ПОГРЕШНОСТЬ=', F10.5)
  102 FORMAT(2X, 'ВРЕМЯ=',
     *8E10.3)
  103 FORMAT(2X, 'ЁМКОСТИ=',
     *8E10.3)
  104 FORMAT(2X, 'TG=', E10.3,
     *2X, 'W=', E10.3)
      CALL FTNSPM(0)
      N=43
      M=7
      W(1)=1E-2
      DO 1 I=2,N
    1 W(I)=W(I-1)*1.467797
      X(1)=0.0106
      X(2)=0.0259
      X(3)=0.06
      X(4)=0.1171
      X(5)=0,223
      X(6)=0.44
      X(7)=-0.8766
      A(1)=1./0.099
      A(2)=1./0.984
      A(3)=1./9.68
      A(4)=1./94.
      A(5)=1./882.
      A(6)=1./7191.
      A(7)=1E-5
      DO 12 I=1,N
      D(I)=0.
      DO 12 J=1,M
   12 D(I)=D(I)+X(J)*
     *(1.-EXP(-A(J)*W(I)))
      DO 15 I=1,N
   15 WRITE(3,104) D(I),W(I)
      A(6)=A(7)*10.
      A(5)=A(6)*10.
      A(4)=A(5)*10.
      A(3)=A(4)*10.
      A(2)=A(3)*10.
      A(1)=A(2)*10.
      DO 2 J=1,M
      B(J)=A(J)
    2 S(J)=A(J)
      H=0.1
      T2=100.
    3 R=0
      MM=M-1
      DO 4 L=1, MM
      R1=1
      IF(L.GT.1) R1=2
      DO 5 V=1,3,R1
      A(L)=B(L)*(1+H)**(2-V)
      DO 6 J=1,M
      DO 6 I=1,N
      C(J,I)=1.-EXP(-A(J)*
     *W(I))
    6 CONTINUE
      DO 7 J=1,M
      G(J,M+1)=0.
      DO 7 I=1,N
    7 G(J,M+1)=G(J,M+1)+
     *C(J,I)
      DO 8 K=1,M
      DO 8 J=1,M
      G(K,J)=0.
      DO 8 I=1,N
    8 G(K,J)=G(K,J)+C(K,I)+
     *C(J,I)/D(I)
      CALL SFINX(G,M,X)
      T1=0.
      DO 9 I=1,N
      T=0.
      DO 19 J=1,M
   19 T=T+C(J,I)*X(J)
      T=1.-T/D(I)
      IF(H-0.08)20,20,21
   20 IF(ABS(T).GT.T1)
     *T1=ABS(T)
      GOTO 9
   21 T1=T1+T*T
    9 CONTINUE
      IF(T1.GT.T2) GOTO 5
      T2=T1
      B(L)=A(L)
      R=1
      DO 11 J=1,M
      Y(J)=X(J)
   11 Z(J)=A(J)
      GOTO 4
    5 CONTINUE
      A(L)=B(L)
    4 CONTINUE
      DO 13 J=1,M
      B(J)=2.*Z(J)-S(J)
   13 S(J)=Z(J)
      IF(R.GT.0) GOTO 3
      T2=100.
      H=H/10.
      WRITE(3,102) Z
      WRITE(3,103) Y
      WRITE(3,101) T1
      IF(H.GT.0.008) GOTO 3
      CO=1E-6
      X(1)=CO*Y(1)/(1.-Y(1))
      A(1)=(CO+X(1))/(CO*
     *X(1)*Z(1))
      X(2)=((CO+X(1))+Y(2)-
     *X(1))/(1.-Y(2))
      A(2)=(CO+X(1)+X(2))/
     *(CO+X(1))/X(2)/Z(2)
      X(3)=((CO+X(1)+X(2))*
```

```
*Y(3)—X(1)—X(2))/(1.—Y(3))
A(3)=(CO+X(1)+X(2)+
*X(3))/((CO+X(1)+
*X(2))+X(3)*Z(3))
X(4)=((CO+X(1)+X(2)+
*X(3))*Y(4)—X(1)—X(2)—X(3))
*/(1.—Y(4))
A(4)=(CO+X(1)+X(2)+X(4)
*+X(3))/((CO+X(1)+X(2)+
*X(3))*X(4)*Z(4))
X(5)=((CO+X(1)+X(2)+
*X(3)+X(4))*Y(5)—X(1)—X(2)—
*X(3)—X(4))/(1.—Y(5))
A(5)=(CO+X(1)+X(2)+
*X(3)+X(4)+X(5))/((CO+X(1)+
*X(2)+X(3)+X(4))*
5X(5)*Z(5))
X(6)=((CO+X(1)+X(2)+
*X(3)+X(4)+X(5))*Y(6)—X(1)—
*X(2)—X(3)—X(4)—X(5))
6/(1.—Y(6))
A(6)=(CO+X(1)+X(2)+
*X(3)+X(4)+X(5)+X(6))/
6((CO+X(1)+X(2)+X(3)+
*X(4)+X(5))*X(6)*Z(6))
A(M)=1./((CO+X(1)+X(2)+
*X(3)+X(4)+X(5)+X(6))*A(M))
WRITE(3,103) X
WRITE(3,102) A
END
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Расчет мощности и энергии тепловыделения в конденсаторах при произвольных формах воздействующего напряжения

Основные обозначения и распечатка программы (подпрограммы SIGMA) на языке ФОРТРАН, предназначенной для расчета мощности тепловыделения в диэлектрике конденсатора при произвольной форме периодического воздействующего напряжения

N — число узлов кусочно-линейной аппроксимации воздействующего напряжения

K — число релаксаторов в схеме замещения конденсатора

T — массив размером N, состоящий из значений t_j

F — массив размером N, состоящий из значений воздействующего напряжения $u(t_j)$

C, W — массивы размером K, состоящие из значений сопротивлений релаксаторов R_i (Ом) и постоянных времени τ_i (с)

P — суммарная мощность тепловыделения в диэлектрике

Примечание. N, K, T, F, C, W являются формальными параметрами подпрограммы SIGMA и их необходимо задавать с удвоенной точностью. Точность определения установления квазистационарного режима в релаксаторах Δ принимается равной 10^{-2}.

```
      DOUBLE PRECISION
     *FUNCTION SIGMA(N,K,T,F,C,W)
      REAL*8T(N),F(N),
     *C(K), W(K)
      REAL*8U(1000), A(1000),
     *B(1000), P,P1,Y,Z,V(1000)
      CALL FTNSPM(0)
      NN=N—1
      DO 2 M=1, NN
      V(M)=T(M+1)—T(M)
      IF(V(M).LT.1E—20)
     *GOTO 3
      B(M)=(F(M+1)—F(M))/V(M)
      A(M)=F(M)
      GOTO 2
    3 A(M)=0.
      B(M)=0.
    2 CONTINUE
      P=0.
      DO 4 I=1,K
      U(1)=0.
    5 DO 6 M=1,NN
      Y=DEXP(—V(M)/W(I))
    6 U(M+1)=A(M)+B(M)*(V(M)—
     *W(I))+(U(M)+B(M)*
     *W(I)—A(M)))*Y
      IF(DABS(U(N)—U(1))
     *.LE.0.01) GOTO 7
      U(1)=U(N)
      GOTO 5
    7 P1=0.
      Z=DSQRT(C(I))
      DO 8 M=1,NN
      Y=DEXP(V(M)/W(I))
    8 P1=P1+V(M)*W(I)**2*
     *(B(M)/C(I))*B(M)+0.5*
     *1(A(M)/Z—B(M)*W(I)/Z—
     *U(M)/Z)**2*W(I)*(1.—Y*Y)+
     *2(I./C(I))*(2.*B(M)*
     *W(I)**2*(A(M)—B(M)*W(I)
     *—U(M))*(1.—Y))
      P=P+P1
    4 CONTINUE
      SIGMA=P/T(N)
      RETURN
      END
```

Основные обозначения и распечатка программы (подпрограммы SUMMA) на языке ФОРТРАН, предназначенной для расчета энергии тепловыделения в диэлектрике конденсатора при произвольной форме непериодического воздействующего напряжения

N — число узлов кусочно-линейной аппроксимации воздействующего напряжения

K — число релаксаторов в схеме замещения конденсатора

T — массив размером N, состоящий из значений t_j

F — массив размером N, состоящий из значений воздействующего напряжения $u(t_j)$

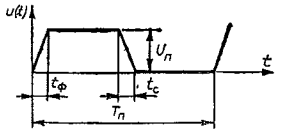
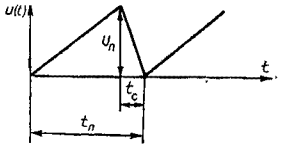
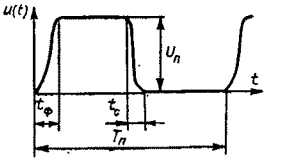
C, W — массивы размером K, состоящие из значений сопротивлений релаксаторов R_i (Ом) и постоянных времени $\tau(c)$

P — суммарная мощность тепловыделения в диэлектрике

Примечание. N, K, T, F, C, W являются формальными параметрами подпрограммы SUMMA и их необходимо задавать с удвоенной точностью.

```
      DOUBLE PRECISION
     *FUNCTION SUMMA (N,K,
     *T,F,C,W)
      REAL*8 U(3000), A(3000)
     *,B(3000),V(3000),P,P1,Y,Z
      CALL FTNSPM(0)
      NN=N—1
      DO 2 M=1,NN
```

Таблица 2.1

Форма напряжения	Параметры схемы замещения диэлектриков	Параметры режима, с		Значение величины мощности тепловыделения P,Вт
		$t_п$	$t_ф$	
Пример 1  Трапецеидальная, с линейным законом изменения фронта и спада импульса $U_п=10^3$В, $t_ф=t_c$, $C_0=10^{-6}$ Ф	Тип диэлектрика ПЭ ($tg\delta=$ $=const=5\cdot10^{-4}$) Значения параметров схемы замещения приведены в табл. 1.1	10^{-2} 10^{-2} 10^{-2} 10^{-3} 10^{-3} 10^{-3}	10^{-4} 10^{-5} 10^{-6} 10^{-4} 10^{-5} 10^{-6}	0,150 0,232 0,304 0,854 1,580 2,306
Пример 2  $U_п=10^3$ В, $C_0=10^{-6}$ Ф	Тип диэлектрика ПЭ ($tg\delta=const=5\cdot10^{-4}$) Значения параметров схемы замещения приведены в табл. 1.1	10^{-2} 10^{-2} 10^{-2} 10^{-2} 10^{-3} 10^{-3} 10^{-3} 10^{-3}	$5\cdot10^{-4}$ 10^{-4} 10^{-5} 10^{-6} $5\cdot10^{-4}$ 10^{-4} 10^{-5} 10^{-6}	0,047 0,070 0,105 0,140 0,277 0,390 0,695 1,045
Пример 3 Форма напряжения из примера 1	Тип диэлектрика ПЭТФ, $T=75°C$ Значения параметров схемы замещения приведены в табл. 1.2	$U_п=500$ В $t_п=4\cdot10^{-3}$с $C_0=10^6$Ф $t_ф=t_c=$ $=2\cdot10^{-5}$с		0,5
Пример 4  Трапецеидальная, с косинусоидальным законом изменения фронта и спада импульса	Тип диэлектрика КОН-II с неполярной пропиткой $\tau_1=1{,}23\cdot10^{-1}$; $C_1=6{,}4\cdot10^{-8}$; $\tau_2=1{,}07\cdot10^{-3}$; $C_2=1{,}6\cdot10^{-7}$; $\tau_3=8{,}95\cdot10^{-6}$; $C_3=3{,}6\cdot10^{-7}$; $\tau_4=1{,}42\cdot10^{-7}$с; $C_4=7{,}5\cdot10^{-7}$Ф	$U_п=200$ В $C_0=10^{-5}$Ф $t_п=2\cdot10^{-3}$с $t_ф=t_c=10^{-5}$с		7,3

Примечание. $R_i=\frac{\tau_i}{C_i}$

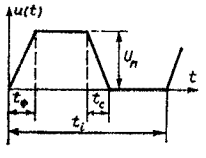
```
      V(M)=T(M+1)—T(M)
      IF(V(M).LT.1E—20)
     *GOTO 3
      B(M)=(F(M+1)—F(M))
     */V(M)
      A(M)=F(M)
      GOTO 2
    3 A(M)=0.
      B(M)=0.
    2 CONTINUE
```

```
      P=0.
      DO 4 I=1,K
      U(1)=0.
5     DO 6 M=1,NN
      Y=DEXP(—V(M)/W(I))
6     U(M+1)=A(M)+B(M)*(V(M)—
     *W(I))+(U(M)+B(M)*
     *W(I)—A(M))*Y
      7 P1=0.
      Z=DSQRT(C(I))
      DO 8 M=1,NN
      Y=DEXP(—V(M)/W(1))
8     P1=P1+V(M)*W(I)**2*
     *(B(M)/C(I))*B(M)+0.5*
     1(A(M)/Z—B(M)*W(I)/Z—
     *U(M)/Z)**2*W(I)*(1.—Y*Y)+
     2(1./C(I))*(2.*B(M)*
     *W(I)**2*(A(M)—B(M)*W(I)—
     *U(M))*(1.—Y))
      P=P+P1
4     CONTINUE
      SUMMA=P/T(N)
      PETURN
      END
```

В табл. 2.1 приводятся примеры расчетов мощности тепловыделения в диэлектриках при периодическом воздействующем напряжении, а в табл. 2.2 дается пример расчета энергии и мощности тепловыделения при непериодическом воздействующем напряжении.

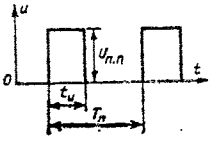
В табл. 2.3 приведены формулы коэффициента потерь N_{i1} в установившемся импульсном режиме, а в табл. 2.4—формулы коэффициента потерь N_{i2} в переходном процессе установления импульсного режима для различных форм напряжения.

Таблица 2.2

Форма напряжения	Параметр режима	Энергия потерь за время t, Вт	Средняя мощность за время, t, Вт
 $U_п=10^3$В; $t_ф = t_c$; $C_0=10^{-6}$Ф	$t_ф = t_c = 2\cdot10^{-5}$с $t_1 = 4\cdot10^{-3}$с $t_i = \frac{1}{250+(i-1)\cdot12}$ при i=2,50 t=0,1034 с	0,09585	0,927

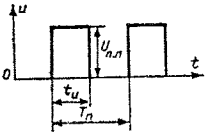
Примечание. Тип диэлектрика ПЭТФ, T = 75°С. Значения параметров схемы замещения приведены в табл. 1.2

1. Прямоугольная



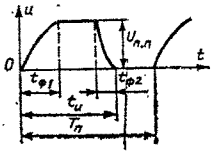
$$N_{i1} = \frac{\left(\exp\frac{T_п - t_и}{\tau_i} - 1\right)\left(\exp\frac{t_и}{\tau_i} - 1\right)}{\left(\exp\frac{T_п}{\tau_i} - 1\right)}$$

2. Та же, что и в п. 1, но $T_п = 2t_и$



$$N_{i1} = \frac{\exp\frac{t_и}{\tau_i} - 1}{\exp\frac{t_и}{\tau_i} - 1}$$

3. Близка к прямоугольной, фронт и спад изменяются по экспоненциальному закону с постоянными времени τ_1 и τ_2



$$N_{i1} = \frac{\tau_i}{1 - \exp\left(-\frac{t_{ф1}}{\tau_1}\right)} \times$$

$$\times\left\{\frac{\exp\frac{T_п}{\tau_i} - \exp\left(-\frac{t_{ф4}}{\tau_1}\right)\exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i}}{(\tau_i - \tau_1)\left[1 - \exp\left(-\frac{t_{ф1}}{\tau_1}\right)\right]\left[\exp\frac{T_п}{\tau_i} - 1\right]} + \frac{\exp\frac{t_и}{\tau_i}\exp\left(-\frac{t_{ф2}}{\tau_2}\right) - \exp\frac{t_и - t_{ф2}}{\tau_i}}{(\tau_i - \tau_2)\left[\exp\frac{T_п}{\tau_i} - 1\right]\left[1 - \exp\left(-\frac{t_{ф2}}{\tau_2}\right)\right]}\right\} \times$$

$$\times\left\{1 - \exp\left(-\frac{t_{ф1}}{\tau_i}\right) - \frac{\tau_1}{\tau_i + \tau_1}\left[1 - \exp\left(-\frac{t_{ф1}}{\tau_i}\right)\exp\left(-\frac{t_{ф1}}{\tau_i}\right)\right]\right\} - \frac{\tau_1}{2(\tau_i + \tau_1)} +$$

$$+ \tau_i\left[\exp\left(-\frac{t_{ф1}}{\tau_i}\right) - \exp\left(-\frac{t_и - t_{ф2}}{\tau_i}\right)\right]\left\{\frac{\exp\frac{T_п}{\tau_i}\left[1 - \exp\left(-\frac{t_{ф1}}{\tau_1}\right)\exp\left(-\frac{t_{ф1}}{\tau_i}\right)\right]}{(\tau_i - \tau_1)\left[1 - \exp\left(-\frac{t_{ф1}}{\tau_1}\right)\right]\left[\exp\frac{T_п}{\tau_i} - 1\right]} +\right.$$

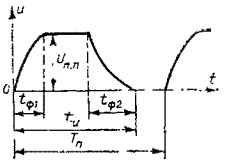
$$\left. + \frac{\exp\frac{t_и}{\tau_i}\exp\left(-\frac{t_{ф2}}{\tau_2}\right) - \exp\frac{t_и - t_{ф2}}{\tau_i}}{(\tau_i - \tau_2)\left[1 - \exp\left(-\frac{t_{ф2}}{\tau_2}\right)\right]\left[\exp\frac{T_п}{\tau_i} - 1\right]}\right\} + \frac{\tau_i}{1 - \exp\left(-\frac{t_{ф2}}{\tau_2}\right)} \times$$

$$\times\left\{\frac{\exp\frac{T_п}{\tau_i}\left[1 - \exp\left(-\frac{t_{ф1}}{\tau_1}\right)\exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i}\right]}{(\tau_i - \tau_1)\left[1 - \exp\left(-\frac{t_{ф1}}{\tau_1}\right)\right]\left[\exp\frac{T_п}{\tau_i} - 1\right]} + \frac{\exp\frac{t_и}{\tau_i}\exp\left(-\frac{t_{ф2}}{\tau_2}\right) - \exp\frac{t_и - t_{ф2}}{\tau_i}\exp\frac{T_п}{\tau_i}}{(\tau_i - \tau_2)\left[1 - \exp\left(-\frac{t_{ф2}}{\tau_2}\right)\right]\left[\exp\frac{T_п}{\tau_i} - 1\right]}\right\} \times$$

$$\times\left\{\exp\left(-\frac{t_{ф2}}{\tau_2}\right)\left[\exp\left(-\frac{t_и}{\tau_i}\right) - \exp\left(-\frac{t_и - t_{ф2}}{\tau_i}\right)\right] - \frac{\tau_2}{\tau_i + \tau_2}\exp\frac{t_и - t_{ф2}}{\tau_2}\left[\exp\left(-\frac{t_и}{\tau_2}\right) \times\right.\right.$$

$$\left.\left. \times \exp\left(-\frac{t_и}{\tau_i}\right) - \exp\left(-\frac{t_и - t_{ф2}}{\tau_2}\right)\exp\left(-\frac{t_и - t_{ф2}}{\tau_i}\right)\right]\right\} + \frac{\tau_2}{2(\tau_i - \tau_2)}$$

4. Та же, что и в п. 3, но $t_{\phi 1} \cong 3\tau_1$, $t_{\phi 2} \cong 3\tau_2$

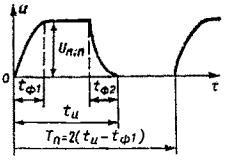


$$N_{i1} = \frac{3\tau_i \exp\dfrac{t_u - t_{\phi 2}}{\tau_i}}{\left(\exp\dfrac{T_n}{\tau_i} - 1\right)} \times$$

$$\times \left[\frac{\exp\dfrac{T_n - t_u + t_{\phi 2}}{\tau_i}}{3\tau_i - t_{\phi 1}} - \frac{1}{3\tau_i - t_{\phi 2}} \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{t_u - t_{\phi 2}}{\tau_i}\right) - \frac{t_{\phi 1}}{3\tau_i + t_{\phi 1}} + \right.$$

$$\left. + \frac{3\tau_i t_{\phi 2} \exp\dfrac{T_n - t_u + t_{\phi 2}}{\tau_i}}{(3\tau_i + t_{\phi 2})\left[\exp\dfrac{T_n}{\tau_i} - 1\right]} \right] \left[\left[\frac{1}{3\tau_i - t_{\phi 1}} - \frac{\exp\dfrac{t_u - t_{\phi 2}}{\tau_i}}{3\tau_i - t_2} \right] + \frac{3\tau_i (t_{\phi 2} - t_{\phi 1})}{2(3\tau_i - t_{\phi 1})(3\tau_i - t_{\phi 2})} \right.$$

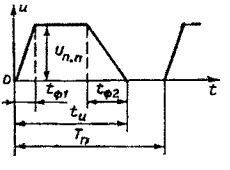
5. Та же, что и в п. 3, но $\tau_1 = \tau_2 = \tau$, $t_{\phi 1} = t_{\phi 2} \cong 3\tau$, $T = 2(t_u - t_{\phi 1})$



$$N_{i1} = \frac{3\tau_i \exp\dfrac{T_n}{2\tau_i}}{(3\tau_i - t_{\phi 1})\left(\exp\dfrac{t_u}{2\tau_i} + 1\right)} \times$$

$$\times \left[\frac{3\tau_i - t_{\phi 1}}{3\tau_i + t_{\phi 1}} - \exp\left(-\frac{T_n}{2\tau_i}\right) \right]$$

6. Трапецеидальная, с линейным законом изменения фронта и спада



$$N_{i1} = \frac{\tau_i}{t_{\phi 1}^2 t_{\phi 2}^2 \left[\exp\dfrac{T_n}{\tau_i} - 1\right]} \times$$

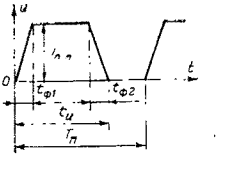
$$\times \left\{ \tau_i t_{\phi 1} t_{\phi 2} \left\{ \exp\frac{t_u}{\tau_i} \left[\exp\left(-\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}\right) + \right.\right.\right.$$

$$\left. + \exp\left(-\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}\right) - \exp\left(-\frac{t_{\phi 1} + t_{\phi 2}}{\tau_i}\right) - 1 \right] + \exp\frac{T_n - t_u}{\tau_i} \left[\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i} + \exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i} - \right.$$

$$\left.\left. - \exp\frac{t_{\phi 1} + t_{\phi 2}}{\tau_i} - 1 \right] \right\} + \tau_i t_{\phi 2}^2 \left\{ \exp\frac{T_n}{\tau_i} \left[\exp\left(-\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}\right) - 1 \right] + \exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i} - 1 \right\} +$$

$$\left. + \tau_i t_{\phi 1}^2 \left\{ \exp\frac{T_n}{\tau_i} \left[\exp\left(-\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}\right) - 1 \right] + \exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i} - 1 \right\} + t_{\phi 1} t_{\phi 2} (t_{\phi 1} + t_{\phi 2}) \left(\exp\frac{T_n}{\tau_i} - 1 \right) \right\}$$

7. Та же, что и в п. 6, но $t_{\phi 1} = t_{\phi 2}$



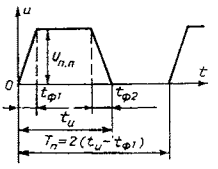
$$N_{i1} = \frac{\tau_i}{t_{\phi 1}^2 \left(\exp\dfrac{T_n}{\tau_i} - 1\right)} \times$$

$$\times \left\{ \tau_i \left\{ \left[\exp\left(-\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}\right) - 1 \right] \left[2\exp\frac{T_n}{\tau_i} + \right.\right.\right.$$

$$\left. + \exp\frac{t_u}{\tau_i} - \exp\frac{t_u - t_{\phi 1}}{\tau_i} \right] + \left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i} - 1 \right) \left[2 + \exp\frac{T_n - t_u}{\tau_i} - \exp\frac{T_n - t_u + t_{\phi 1}}{\tau_i} \right] \right\} +$$

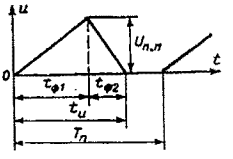
$$\left.\left. + 2t_{\phi 1} \left(\exp\frac{T_n}{\tau_i} - 1 \right) \right\} \right.$$

8. Та же, что и в п. 7, но $T_{\text{п}} = 2(t_{\text{и}} - t_{\phi 1})$



$$N_{i1} = \frac{2\tau_i}{t_{\phi 1}^2}\left[t_{\phi 1} + \frac{\tau_i\left(1 - \exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}\right)\left(\exp\frac{t_{\text{и}} - 2t_{\phi 1}}{\tau_i} + 1\right)}{\left(\exp\frac{t_{\text{и}} - t_{\phi 1}}{\tau_i} + 1\right)}\right]$$

9. Пилообразная



$$N_{i1} = \frac{\tau_i}{t_{\phi 1}^2 t_{\phi 2}^2\left(\exp\frac{T_{\text{п}}}{\tau_i} - 1\right)} \times$$

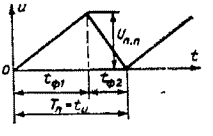
$$\times \left\{ t_{\phi 1} t_{\phi 2} \tau_i \left\{ \left[\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i} + \exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i} - \right.\right.\right.$$

$$\left. - \exp\frac{t_{\phi 1} + t_{\phi 2}}{\tau_i} - 1 \right] + \exp\frac{T_{\text{п}}}{\tau_i}\left[\exp\left(-\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}\right) + \exp\left(-\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}\right) - \exp\left(-\frac{t_{\text{и}}}{\tau_i}\right) - 1 \right] \Big\} +$$

$$+ \tau_i t_{\phi 2}^2 \left\{ \exp\frac{T_{\text{п}}}{\tau_i}\left[\exp\left(-\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}\right) - 1 \right] + \exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i} - 1 \right\} + \tau_i t_{\phi 1}^2 \left\{ \exp\frac{T_{\text{п}}}{\tau_i}\left[\exp\left(-\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}\right) - 1 \right] + \right.$$

$$\left. + \exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i} - 1 \right\} + t_{\phi 1} t_{\phi 2} t_{\text{и}} \left(\exp\frac{T_{\text{и}}}{\tau_i} - 1 \right) \Big\}$$

10. Та же, что и в п. 9, но $t_{\text{и}} = T_{\text{п}}$

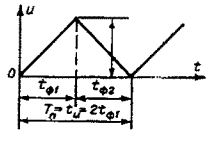


$$N_{i1} = \frac{\tau_i t_{\text{и}}}{t_{\phi 1}^2 t_{\phi 2}^2\left(\exp\frac{T_{\text{п}}}{\tau_i} - 1\right)} \times$$

$$\times \left[\tau_i t_{\text{и}} \left(\exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i} - 1 \right)\left(1 - \exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i} \right) + \right.$$

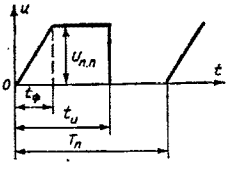
$$\left. + t_{\phi 1} t_{\phi 2} \left(\exp\frac{t_{\text{и}}}{\tau_i} - 1 \right) \right]$$

11. Треугольная, причём $t_{\phi 1} = t_{\phi 2}$, $t_{\text{и}} = 2t_{\phi 1} = T_{\text{п}}$



$$N_{i1} = \frac{2\tau_i}{t_{\phi 1}^2}\left[t_{\phi 1} - \frac{2\tau_i\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i} - 1\right)}{\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i} + 1\right)} \right]$$

12. Та же, что и в п. 6, но $t_{\phi 2} = 0$



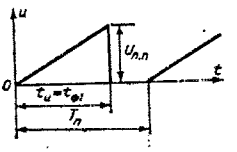
$$N_{i1} = \frac{1}{t_{\phi 1}^2\left(\exp\frac{T_{\text{п}}}{\tau_i} - 1\right)} \times$$

$$\times \left\{ \tau_i^2 \left\{ \exp\frac{T_{\text{п}}}{\tau_i}\left[\exp\left(-\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}\right) - 1 \right] + \right.\right.$$

$$\left. + \exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i} - 1 \right\} + \tau_i t_{\phi 1} \left\{ \exp\frac{T_{\text{п}}}{\tau_i}\left[\exp\left(-\frac{t_{\text{и}}}{\tau_i}\right) - \exp\left(-\frac{t_{\text{и}} t_{\phi 1}}{\tau_i}\right) + 1 \right] + \right.$$

$$\left. + \exp\frac{t_{\text{и}}}{\tau_i}\left[\exp\left(-\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}\right) - 1 \right] - 1 \right\} + 0{,}5 t_{\phi 1}^2 \left(\exp\frac{T_{\text{п}}}{\tau_i} + 1 \right) \Big\}$$

13. Та же, что и в п. 9, но $t_{ф2}=0$, $t_и=t_{ф1}$

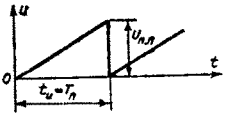


$$N_{i1}=\frac{1}{t_{ф1}^2\left(\exp\frac{T_п}{\tau_i}-1\right)}\times$$

$$\times\left\{\tau_i^2\left\{\exp\frac{T_п}{\tau_i}\left[\exp\left(-\frac{t_{ф1}}{\tau_i}\right)-1\right]+\right.\right.$$

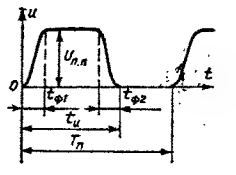
$$\left.\left.+\exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i}-1\right\}+\tau_i t_{ф1}\left[\exp\frac{T_п-t_{ф1}}{\tau_i}-\exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i}\right]+0{,}5\,t_{ф1}^2\left[\exp\frac{T_п}{\tau_i}+1\right]\right\}$$

14. Та же, что и в п. 13, но $t_и=t_{ф1}=T_п$



$$N_{i1}=\frac{1}{2}\left[\frac{\left(\exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i}+1\right)}{\left(\exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i}-1\right)}-\frac{2\tau_i}{t_{ф1}}\right]$$

15. Близка к трапецеидальной, фронт и спад изменяются по косинусоидальному закону



$$N_{i1}=\frac{\left(\pi^2\tau_i^2\right)^2}{4\left(\exp\frac{T_и}{\tau_i}-1\right)}\times$$

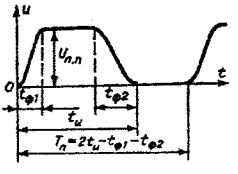
$$\times\left\{\frac{1}{\left(t_{ф1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i}+1\right)\times\right.\right.$$

$$\left.\times\left(\exp\frac{T_п-t_{ф1}}{\tau_i}+1\right)\right]+\frac{1}{\left(t_{ф2}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{ф2}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_п-t_{ф2}}{\tau_i}+1\right)\right]-$$

$$-\frac{1}{\left(t_{ф1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{ф2}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[\left(\exp\frac{t_{ф2}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i}-1\right)\left(\exp\frac{T_п-t_и}{\tau_i}+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\exp\frac{t_и-t_{ф1}-t_{ф2}}{\tau_i}\right]\right\}+\frac{\pi^2\tau_i}{8}\left[\frac{t_{ф1}}{\left(t_{ф1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}+\frac{t_{ф2}}{\left(t_{ф2}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\right]$$

16. Та же, что и в п. 15, но $T_п=2t_и-t_{ф1}-t_{ф2}$



$$N_{i1}=\frac{\left(\pi^2\tau_i^2\right)^2}{4\left(\exp\frac{2t_и-t_{ф1}-t_{ф2}}{\tau_i}-1\right)}\times$$

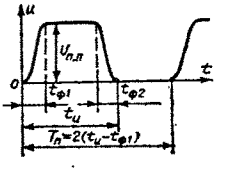
$$\times\left\{\frac{1}{\left(t_{ф1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i}+1\right)\times\right.\right.$$

$$\left.\times\left(\exp\frac{2(t_и-t_{ф1})-t_{ф2}}{\tau_i}+1\right)\right]+\frac{1}{\left(t_{ф2}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{ф2}}{\tau_i}+1\right)\times\right.$$

$$\left.\times\left(\exp\frac{2(t_и-t_{ф2})-t_{ф1}}{\tau_i}+1\right)\right]-\frac{2}{\left(t_{ф1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{ф2}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[\left(\exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{ф2}}{\tau_i}+1\right)\times\right.$$

$$\left.\left.\times\exp\frac{t_и-t_{ф1}-t_{ф2}}{\tau_i}\right]\right\}+\frac{\pi^2\tau_i}{8}\left[\frac{t_{ф1}}{\left(t_{ф1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}+\frac{t_{ф2}}{\left(t_{ф2}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\right]$$

17. Та же, что и в п. 15, но $t_{ф1}=t_{ф2}$

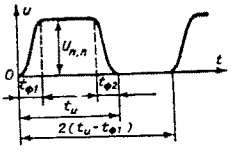


$$N_{i1}=\frac{\left(\pi^2\tau_i^2\right)^2}{4\left(\exp\frac{T_п}{\tau_i}-1\right)}\times$$

$$\times\left\{\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[2\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)-\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\text{и}}}{\tau_i}+\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.+\exp\frac{t_{\text{и}}-2t_{\phi1}}{\tau_i}\right)\right]\right\}\div\frac{\pi^2\tau_i t_{\phi1}}{4\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}$$

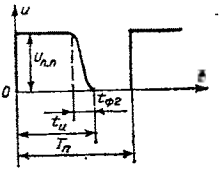
18. Та же, что и в п. 17, но $T_{\text{п}}=2(t_{\text{и}}-t_{\phi1})$



$$N_{i1}=\frac{\left(\pi^2\tau_i^2\right)^2}{2\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2\left(\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)}\times$$

$$\times\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\text{и}}-2t_{\phi1}}{\tau_i}-1\right)\right]\div\frac{\pi^2\tau_i t_{\phi1}}{4\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}$$

19. Та же, что и в п. 15, но $t_{\phi1}=0$



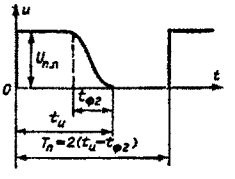
$$N_{i1}=\frac{\left(\exp\frac{T_{\text{п}}}{\tau_i}+1\right)}{2\left(\exp\frac{T_{\text{п}}}{\tau_i}-1\right)}\div$$

$$\div\frac{\left(\pi^2\tau_i^2\right)^2}{4\left(t_{\phi2}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2\left(\exp\frac{T_{\text{п}}}{\tau_i}-1\right)}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi2}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\phi2}}{\tau_i}+1\right)\right]-$$

$$-\frac{\pi^2\tau_i^2}{2\left(t_{\phi2}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(\exp\frac{T_{\text{п}}}{\tau_i}-1\right)}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi2}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\text{и}}}{\tau_i}+\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi2}}{\tau_i}\right)\right]\div$$

$$\div\frac{\pi^2\tau_i t_{\phi2}}{8\left(t_{\phi2}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}$$

20. Та же, что и в п. 16, но $t_{\phi1}=0$



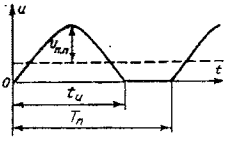
$$N_{i1}=\frac{1}{4\left(\exp\frac{2(t_{\text{и}}-t_{\phi2})}{\tau_i}-1\right)}\times$$

$$\times\left\{2\left[\exp\frac{2t_{\text{и}}+t_{\phi2}}{\tau_i}\div1\right]\div\right.$$

$$\div\frac{\left(\pi^2\tau_i^2\right)^2}{\left(t_{\phi2}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi2}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{2(t_{\text{и}}+t_{\phi2})}{\tau_i}\div1\right)\right]-\frac{4\pi^2\tau_i^2}{\left(t_{\text{и}}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\times$$

$$\left.\times\left(\exp\frac{t_{\phi2}}{\tau_i}+1\right)\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi2}}{\tau_i}\right\}\div\frac{\pi^2\tau_i t_{\phi2}}{8\left(t_{\phi2}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}$$

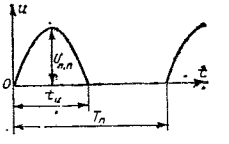
21. Синусоидальная, ограниченная на произвольном уровне



$$N_{i1} = \frac{\pi^2 \tau_i t_и}{\left(t_и^2 + \pi^2 \tau_i^2\right)} \left[\frac{1}{2} - \right.$$

$$\left. - \frac{\tau_i t_и}{\left(t_и^2 + \pi^2 \tau_i^2\right)} \times \frac{\left(\exp\frac{T_п - t_и}{\tau_i} + 1\right)\left(\exp\frac{t_и}{\tau_i} + 1\right)}{\left(\exp\frac{T_и}{\tau_i} - 1\right)}\right]$$

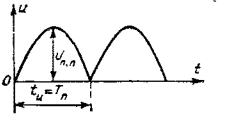
22. Та же, что и в п. 21, но $T_п = 2t_и$



$$N_{i1} = \frac{\pi^2 \tau_i t_и}{2\left(t_и^2 + \pi^2 \tau_i^2\right)} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{2} - \frac{\tau_i t_и}{\left(t_и^2 + \pi^2 \tau_i^2\right)} \frac{\left(\exp\frac{t_и}{\tau_i} + 1\right)}{\left(\exp\frac{t_и}{\tau_i} - 1\right)}\right]$$

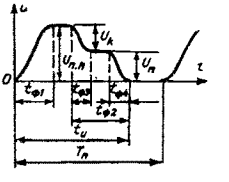
23. Та же, что и в п. 21, но $t_и = T_и$



$$N_{i1} = \frac{\pi^2 \tau_i t_и}{\left(t_и^2 + \pi^2 \tau_i^2\right)} \times$$

$$\times \left[\frac{1}{2} - \frac{2\tau_i t_и}{\left(t_и^2 + \pi^2 \tau_i^2\right)} \frac{\left(\exp\frac{t_и}{\tau_i} + 1\right)}{\left(\exp\frac{t_и}{\tau_i} - 1\right)}\right]$$

24. Сложная, характерная для конденсаторов формирующей линии импульсного модулятора



$$N_{i1} = \frac{\left(\pi^2 \tau_i^2\right)^2}{4\left(t_{ф1}^2 + \pi^2 \tau_i^2\right)^2 \left(\exp\frac{T_и}{\tau_i} - 1\right)} \times$$

$$\times \left[\left(\exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i} + 1\right)\left(\exp\frac{T_и - t_{ф1}}{\tau_i} + 1\right)\right] +$$

$$+ \frac{\frac{U_к^2}{U_{п.п}^2}\left(\pi^2 \tau_i^2\right)^2}{4\left(t_{ф3}^2 + \pi^2 \tau_i^2\right)^2 \left(\exp\frac{T_и}{\tau_i} - 1\right)} \left[\left(\exp\frac{t_{ф3}}{\tau_i} + 1\right)\left(\exp\frac{T_п - t_{ф3}}{\tau_i} + 1\right)\right] +$$

$$+ \frac{\frac{U_п^2}{U_{п.п}^2}\left(\pi^2 \tau_i^2\right)^2}{4\left(t_{ф4}^2 + \pi^2 \tau_i^2\right)^2 \left(\exp\frac{T_п}{\tau_i} - 1\right)} \left[\left(\exp\frac{t_{ф4}}{\tau_i} + 1\right)\left(\exp\frac{T_и - t_{ф4}}{\tau_i} + 1\right)\right] -$$

$$- \frac{\frac{U_к}{U_{п.п}}\left(\pi^2 \tau_i^2\right)^2}{4\left(t_{ф1}^2 + \pi^2 \tau_i^2\right)\left(t_{ф3}^2 + \pi^2 \tau_i^2\right)\left(\exp\frac{T_п}{\tau_i} - 1\right)} \left[\left(\exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i} + 1\right)\left(\exp\frac{t_{ф3}}{\tau_i} + 1\right)\left(\exp\frac{t_и - t_{ф2} - t_{ф1}}{\tau_i} + \right.\right.$$

$$+\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\text{и}}-t_{\phi 2}-t_{\phi 3}}{\tau_i}\Big)\Big]+\frac{\dfrac{U_{\text{п}}U_{\text{к}}}{U^2_{\text{п.п}}}\left(\pi^2\tau_i^2\right)^2}{4\left(t^2_{\phi 3}+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t^2_{\phi 4}+\pi^2\tau_i^2\right)\left(\exp\dfrac{T_{\text{п}}}{\tau_i}-1\right)}\times$$

$$\times\left[\left(\exp\frac{t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi 4}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\phi 2}}{\tau_i}+\exp\frac{t_{\phi 2}-t_{\phi 3}-t_{\phi 4}}{\tau_i}\right)\right]+$$

$$+\frac{\pi^2\tau_i}{8}\left[\frac{t_{\phi 1}}{\left(t^2_{\phi 1}+\pi^2\tau_i^2\right)}+\frac{\dfrac{U^2_{\text{к}}}{U^2_{\text{п.п}}}t_{\phi 3}}{\left(t^2_{\phi 3}+\pi^2\tau_i^2\right)}+\frac{\dfrac{U^2_{\text{п}}}{U^2_{\text{п.п}}}t_{\phi 4}}{\left(t^2_{\phi 1}+\pi^2\tau_i^2\right)}\right]-$$

$$-\frac{\dfrac{U_{\text{п}}}{U_{\text{п.п}}}\left(\pi^2\tau_i^2\right)^2}{4\left(t^2_{\phi 1}+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t^2_{\phi 4}+\pi^2\tau_i^2\right)\left(\exp\dfrac{T_{\text{п}}}{\tau_i}-1\right)}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi 4}}{\tau_i}+1\right)\times\right.$$

$$\left.\times\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\text{и}}}{\tau_i}+\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi 1}-t_{\phi 4}}{\tau_i}\right)\right]$$

25. Та же, что и в п. 24, но $U_{\text{к}}=U_{\text{и}}=0{,}5\,U_{\text{п.п}}$

$$N_{i1}=\frac{\left(\pi^2\tau_i^2\right)^2}{4\left(\exp\dfrac{T_{\text{п}}}{\tau_i}-1\right)}\left\{\frac{1}{\left(t^2_{\phi 1}+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)\times\right.\right.$$

$$\left.\times\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)\right]+\frac{1}{4\left(t^2_{\phi 3}+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)\right]+$$

$$+\frac{1}{4\left(t^2_{\phi 4}+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi 4}}{\tau_i}+1\right)\times\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\phi 4}}{\tau_i}+1\right)\right]-$$

$$-\frac{1}{2\left(t^2_{\phi 1}+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t^2_{\phi 3}+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)\times\right.$$

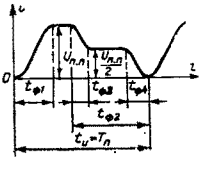
$$\left.\times\left(\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi 2}-t_{\phi 1}}{\tau_i}+\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\text{и}}+t_{\phi 2}-t_{\phi 3}}{\tau_i}\right)\right]+\frac{1}{4\left(t^2_{\phi 3}+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t^2_{\phi 4}+\pi^2\tau_i^2\right)}\times$$

$$\times\left[\left(\exp\frac{t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi 4}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\phi 2}}{\tau_i}+\exp\frac{t_{\phi 2}-t_{\phi 3}-t_{\phi 4}}{\tau_i}\right)\right]-$$

$$-\frac{1}{2\left(t^2_{\phi 1}+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t^2_{\phi 4}+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi 4}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\text{и}}}{\tau_i}+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi 1}-t_{\phi 4}}{\tau_i}\right)\right]\Big\}+\frac{\pi^2\tau_i}{8}\left[\frac{t_{\phi 1}}{\left(t^2_{\phi 1}+\pi^2\tau_i^2\right)}+\frac{t_{\phi 3}}{4\left(t^2_{\phi 3}+\pi^2\tau_i^2\right)}+\frac{t_{\phi 4}}{4\left(t^2_{\phi 4}+\pi^2\tau_i^2\right)}\right]$$

26. Та же, что и в п. 25, но $T_{\text{п}}=t_{\text{п}}$



$$N_{i1}=\frac{\left(\pi^2\tau_i^2\right)^2}{4\left(\exp\dfrac{t_{\text{и}}}{\tau_i}-1\right)}\times$$

$$\times\left\{\frac{1}{\left(t^2_{\phi 1}+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)\times\right.\right.$$

$$\times\left(\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\Bigg]+\frac{1}{4\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\right]+$$

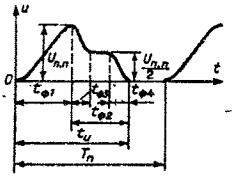
$$+\frac{1}{4\left(t_{\phi4}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi4}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi4}}{\tau_i}+1\right)\right]-\frac{1}{2\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\times$$

$$\times\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi1}-t_{\phi2}}{\tau_i}+1\right)\right]+$$

$$+\frac{1}{4\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{\phi4}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi4}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi2}}{\tau_i}+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\exp\frac{t_{\phi2}-t_{\phi3}-t_{\phi4}}{\tau_i}\right)\right]\Bigg\}+\frac{\pi^2\tau_i}{8}\left[\frac{t_{\phi1}}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}+\frac{t_{\phi3}}{4\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}+\frac{t_{\phi4}}{4\left(t_{\phi4}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\right]$$

27. Та же, что и в п. 25, но $t_{\text{и}}=t_{\phi1}+t_{\phi2}$



$$N_{i1}=\frac{\left(\pi^2\tau_i^2\right)^2}{4\left(\exp\frac{T_{\text{п}}}{\tau_i}-1\right)}\times$$

$$\times\left\{\frac{1}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\times\right.\right.$$

$$\times\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\Bigg]+\frac{1}{4\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\right]+$$

$$+\frac{1}{4\left(t_{\phi4}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi4}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\phi4}}{\tau_i}+1\right)-\frac{1}{2\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\times\right.$$

$$\times\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_{\text{и}}-t_{\phi1}-t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\right]-$$

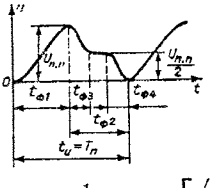
$$-\frac{1}{2\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{\phi4}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi4}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\text{и}}}{\tau_i}+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\exp\frac{t_{\phi2}-t_{\phi4}}{\tau_i}\right)\right]+\frac{1}{4\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{\phi4}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi4}}{\tau_i}+1\right)\times\right.$$

$$\left.\left.\times\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\phi2}}{\tau_i}+\exp\frac{t_{\phi2}-t_{\phi3}-t_{\phi4}}{\tau_i}\right)\right]\right\}+\frac{\pi^2\tau_i}{8}\left[\frac{t_{\phi1}}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}+\frac{t_{\phi3}}{4\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}+\right.$$

$$\left.+\frac{t_{\phi4}}{4\left(t_{\phi4}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\right]$$

28. Та же, что и в п. 27, но $t_{\text{п}}=T_{\text{и}}$



$$N_{i1}=\frac{\left(\pi^2\tau_i^2\right)^2}{4\left(\exp\frac{t_{\text{и}}}{\tau_i}-1\right)}\times$$

$$\times\left\{\frac{1}{\left(t_{\phi_1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\times\right.$$

$$\times\left(\exp\frac{t_{\phi2}}{\tau_i}+1\right)\Bigg]+\frac{1}{4\left(t_{\phi3}+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\right]+$$

$$+\frac{1}{4\left(t_{\phi4}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi4}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_и-t_{\phi4}}{\tau_i}+1\right)\right]-\frac{1}{2\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\times$$

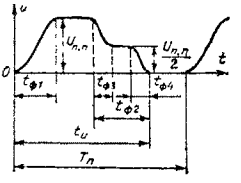
$$\times\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi2}-t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\right]-\frac{1}{2\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{\phi4}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\times$$

$$\times\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi4}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi2}-t_{\phi4}}{\tau_i}+1\right)\right]+\frac{1}{4\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\times$$

$$\times\left[\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi4}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+\exp\frac{t_{\phi2}-t_{\phi3}-t_{\phi4}}{\tau_i}\right)\right]\Bigg\}+\frac{\pi^2\tau_i}{8}\times$$

$$\times\left[\frac{t_{\phi1}}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}+\frac{t_{\phi3}}{4\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}+\frac{t_{\phi4}}{4\left(t_{\phi4}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\right]$$

29. Та же, что и в п. 25, но $t_{\phi3}=t_{\phi4}$



$$N_{i1}=\frac{\left(\pi^2\tau_i^2\right)^2}{4\left(\exp\frac{T_п}{\tau_i}-1\right)}\times$$

$$\times\left\{\frac{1}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\times\right.\right.$$

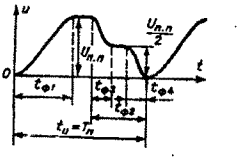
$$\times\left(\exp\frac{T_п-t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\Bigg]+\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)}{4\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[2\left(\exp\frac{T_п-t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)+\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\times\right.$$

$$\times\left.\left(\exp\frac{T_п-t_{\phi2}}{\tau_i}+\exp\frac{t_{\phi2}-2t_{\phi3}}{\tau_i}\right)\right]-\frac{1}{2\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\times\right.$$

$$\times\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_п-t_и}{\tau_i}+\exp\frac{t_и-t_{\phi1}-t_{\phi3}}{\tau_i}+\exp\frac{t_и-t_{\phi2}-t_{\phi1}}{\tau_i}+\right.$$

$$\left.\left.\left.+\exp\frac{T_п-t_и+t_{\phi2}-t_{\phi3}}{\tau_i}\right)\right]\right\}+\frac{\pi^2\tau_i}{8}\left[\frac{t_{\phi1}}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}+\frac{t_{\phi3}}{2\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\right]$$

30. Та же, что и в п. 29, но $T_п=t_и$



$$N_{i1}=\frac{\left(\pi^2\tau_i^2\right)^2}{4\left(\exp\frac{t_и}{\tau_i}-1\right)}\times$$

$$\times\left\{\frac{4}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\times\right.\right.$$

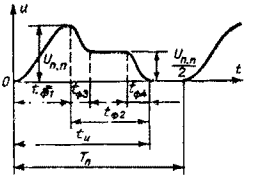
$$\times\left(\exp\frac{t_и-t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\Bigg]+\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)}{4\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[2\left(\exp\frac{t_и-t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)+\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\times\right.$$

$$\times\left.\left(\exp\frac{t_и-t_{\phi2}}{\tau_i}+\exp\frac{t_{\phi2}-2t_{\phi3}}{\tau_i}\right)\right]-\frac{1}{2\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\times\right.$$

$$\times\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi2}-t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\exp\frac{t_{и}-t_{\phi1}-t_{\phi2}}{\tau_i}+1\Bigg]\Bigg\}+\frac{\pi^2\tau_i}{8}\left[\frac{t_{\phi1}}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}+\right.$$

$$\left.+\frac{t_{\phi3}}{2\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\right]$$

31. Та же, что и в п. 29, но $t_{и}=t_{\phi1}+t_{\phi2}$



$$N_{i1}=\frac{\left(\pi^2\tau_i^2\right)^2}{4\left(\exp\frac{T_{и}}{\tau_i}-1\right)}\times$$

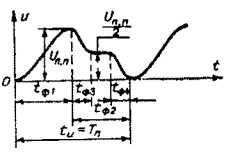
$$\times\left\{\frac{1}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\times\right.\right.$$

$$\times\left(\exp\frac{T_{п}-t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)+\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)}{4\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\times\left[2\left(\exp\frac{T_{и}-t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)+\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\times\right.$$

$$\left.\times\left(\exp\frac{T_{п}-t_{\phi2}}{\tau_i}+\exp\frac{t_{\phi2}-2t_{\phi3}}{\tau_i}\right)\right]-\frac{1}{2\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\times\right.$$

$$\left.\left.\left.\times\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi2}-t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\right]\right]\right\}+\frac{\pi^2\tau_i}{8}\left[\frac{t_{\phi1}}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}+\frac{t_{\phi3}}{2\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\right]$$

32. Та же, что и в п. 31, но $T_{п}=t_{и}$



$$N_{i1}=\frac{\left(\pi^2\tau_i^2\right)^2}{4\left(\exp\frac{t_{и}}{\tau_i}-1\right)}\times$$

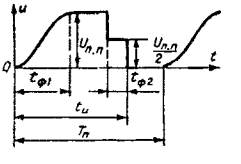
$$\times\left\{\frac{1}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\times\right.\right.$$

$$\times\left(\exp\frac{t_{\phi2}}{\tau_i}+1\right)\Bigg]+\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)}{4\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[2\left(\exp\frac{t_{и}-t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)+\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+\right.\right.$$

$$\left.+\exp\frac{t_{\phi2}-2t_{\phi3}}{\tau_i}\right)\Bigg]-\frac{1}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\times\right.$$

$$\left.\left.\left.\times\left(\exp\frac{t_{\phi2}-t_{\phi3}}{\tau_i}+1\right)\right]\right]\right\}+\frac{\pi^2\tau_i}{8}\left[\frac{t_{\phi1}}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}+\frac{t_{\phi3}}{2\left(t_{\phi3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\right]$$

33. Та же, что и в п. 29, но $t_{\phi3}=t_{\phi4}=0$



$$N_{i1}=\frac{1}{4\left(\exp\frac{T_{п}}{\tau_i}-1\right)}\times$$

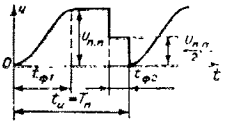
$$\times\left\{\frac{\left(\pi^2\tau_i^2\right)^2}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\times\right.\right.$$

$$\left.\left.\times\left(\exp\frac{T_{п}-t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\right]+\left[\left(\exp\frac{t_{\phi2}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_{и}-t_{\phi2}}{\tau_i}+1\right)\right]-\frac{\pi^2\tau_i^2}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\times\right.$$

$$\times\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi2}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\text{и}}}{\tau_i}+\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi1}-t_{\phi2}}{\tau_i}\right)\right]\Bigg\}+$$

$$+\frac{\pi^2\tau_i t_{\phi1}}{8\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}$$

34. Та же, что и в п. 33, но $t_{\text{и}}=T_{\text{п}}$

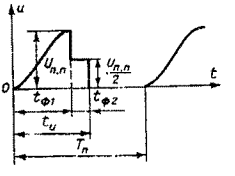


$$N_{i1}=\frac{1}{4\left(\exp\frac{t_{\text{и}}}{\tau_i}-1\right)}\times$$

$$\times\left\{\frac{(\pi^2\tau_i^2)^2}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\right]+\left[\left(\exp\frac{t_{\phi2}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi2}}{\tau_i}+1\right)\right]-\right.$$

$$\left.-\frac{\pi^2\tau_i^2}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}-1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi2}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi1}-t_{\phi2}}{\tau_i}+1\right)\right]\right\}+\frac{\pi^2\tau_i t_{\phi1}}{8\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}$$

35. Та же, что и в п. 33, но $t_{\text{и}}=t_{\phi1}+t_{\phi2}$



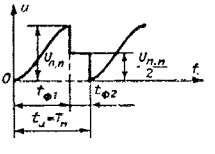
$$N_{i1}=\frac{1}{4\left(\exp\frac{T_{\text{п}}}{\tau_i}-1\right)}\times$$

$$\times\left\{\frac{(\pi^2\tau_i^2)^2}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\times\right.\right.$$

$$\left.\times\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\right]+\left[\left(\exp\frac{t_{\phi2}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\phi2}}{\tau_i}+1\right)\right]-\frac{\pi^2\tau_i^2}{\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\times$$

$$\left.\times\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi2}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_{\text{п}}-t_{\text{и}}}{\tau_i}+1\right)\right]\right\}+\frac{\pi^2\tau_i t_{\phi1}}{8\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}$$

36. Та же, что и в п. 35, но $t_{\text{и}}=T_{\text{п}}$

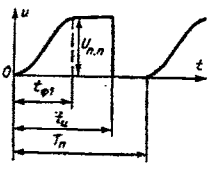


$$N_{i1}=$$

$$=\frac{t_{\phi1}^4\left[\left(\exp\frac{t_{\phi1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi2}}{\tau_i}-1\right)\right]}{4\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2\left(\exp\frac{t_{\text{и}}}{\tau_i}-1\right)}+$$

$$+\frac{\pi^2\tau_i t_{\phi1}}{8\left(t_{\phi1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}$$

37. Та же, что и в п. 33, но $t_{\phi 2}=0$



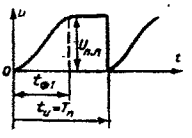
$$N_{i1}=\frac{1}{4\left(\exp\frac{T_n}{\tau_i}-1\right)}\times$$

$$\times\left\{\left[\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_n-t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)\right]\times\right.$$

$$\times\frac{\left(\pi^2\tau_i^2\right)^2}{\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2}+2\left(\exp\frac{T_n}{\tau_i}+1\right)-\frac{2\pi^2\tau_i^2}{\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\times\left[\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_n-t_u}{\tau_i}+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\exp\frac{t_u-t_{\phi 1}}{\tau_i}\right)\right]\Bigg\}-\frac{\pi^2\tau_i t_{\phi 1}}{8\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}$$

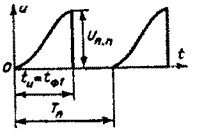
38. Та же, что и в п. 37, но $t_u=T_n$



$$N_{i1}=\frac{\left(\exp\frac{t_u}{\tau_i}+1\right)}{2\left(\exp\frac{t_u}{\tau_i}-1\right)}-$$

$$-\frac{\pi^2\tau_i^2\left(2t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}{4\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(\exp\frac{t_u}{\tau_i}-1\right)}\left[\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_u-t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)\right]+\frac{\pi^2\tau_i^2 t_{\phi 1}}{8\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}$$

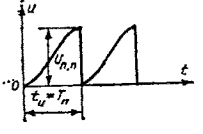
39. Та же, что и в п. 35, но $t_{\phi 2}=0$, т. е. $t_u=t_{\phi 1}$



$$N_{i1}=\frac{\left(\exp\frac{T_n}{\tau_i}+1\right)}{2\left(\exp\frac{T_n}{\tau_i}-1\right)}-$$

$$-\frac{\pi^2\tau_i^2\left(2t_u^2+\pi^2\tau_i^2\right)}{4\left(t_u^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2\left(\exp\frac{T_n}{\tau_i}-1\right)}\left[\left(\exp\frac{t_u}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{T_n-t_u}{\tau_i}+1\right)\right]+\frac{\pi^2\tau_i t_u}{8\left(t_u^2+\pi^2\tau_i^2\right)}$$

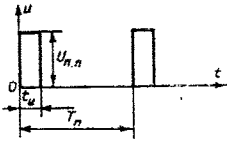
40. Та же, что и в п. 39, но $t_u=T_n$



$$N_{i1}=\frac{t_u^4\left(\exp\frac{t_u}{\tau_i}+1\right)}{2\left(t_u^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2\left(\exp\frac{t_u}{\tau_i}-1\right)}+$$

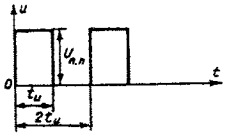
$$+\frac{\pi^2\tau_i t_u}{8\left(t_u^2+\pi^2\tau_i^2\right)}$$

1. Прямоугольная



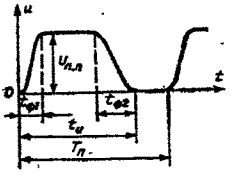
$$N_{i2} = \frac{\left(\exp\frac{t_и}{\tau_i} - 1\right)^2}{\exp\frac{t_и}{\tau_i}\left(\exp\frac{T_п}{\tau_i} - 1\right)}$$

2. Та же, что и в п. 1, но $T_и = 2t_и$



$$N_{i2} = \frac{1 - \exp\left(-\frac{t_и}{\tau_i}\right)}{\exp\frac{t_и}{\tau_i} + 1}$$

3. Близка к трапецендальной, фронт и спад изменяются по косинусоидальному закону



$$N_{i2} = \frac{\pi^2\tau_i^2}{4\left(\exp\frac{T_п}{\tau_i} - 1\right)} \times$$

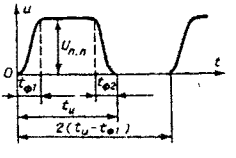
$$\times\left\{\frac{\left[1 + \exp\left(-\frac{t_{ф1}}{\tau_i}\right)\right]}{\left(t_{ф1}^2 + \pi^2\tau_i^2\right)}\left[\exp\left(-\frac{t_и - t_{ф1}}{\tau_i}\right)\left(\exp\frac{t_{ф2}}{\tau_i} + 1\right) - \left(\exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i} + 1\right)\right] + \right.$$

$$+ \frac{\left[1 + \exp -\left(\frac{t_{ф2}}{\tau_i}\right)\right]}{\left(t_{ф2}^2 + \pi^2\tau_i^2\right)}\left[\exp\frac{t_и - t_{ф1}}{\tau_i}\left(\exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i} + 1\right) - \left(\exp\frac{t_{ф2}}{\tau_i} + 1\right)\right] +$$

$$+ \frac{t_{ф1}^2\left(\exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i} + 1\right)^2}{\left(t_{ф1}^2 + \pi^2\tau_i^2\right)^2 \exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i}} + \frac{t_{ф2}\left(\exp\frac{t_{ф2}}{\tau_i} + 1\right)^2}{\left(t_{ф2}^2 + \pi^2\tau_i^2\right)^2 \exp\frac{t_{ф2}}{\tau_i}} - \frac{\left(\exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i} + 1\right)\left(\exp\frac{t_{ф2}}{\tau_i} + 1\right)}{\left(t_{ф1}^2 + \pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{ф2}^2 + \pi^2\tau_i^2\right)} \times$$

$$\left. \times\left[t_{ф1}^2 \exp\frac{t_и - t_{ф1} - t_{ф2}}{\tau} + t_{ф2} \exp\left(-\frac{t_и}{\tau_i}\right)\right]\right\}$$

4. Та же, что и в п. 3, но $t_{ф1} = t_{ф2}$

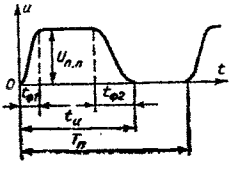


$$N_{i2} = \left(\pi^2\tau_i^2\right)^2\left(\exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i} + 1\right)^2 \times$$

$$\times\left(\exp\frac{t_и - t_{ф1}}{\tau_i} - 1\right)^2 / 4\left(t_{ф1}^2 + \pi^2\tau_i^2\right) \times$$

$$\times\left(\exp\frac{t_и}{\tau_i}\right)\left(\exp\frac{T_п}{\tau_i} - 1\right)$$

5. Та же, что и в п. 4, но скважность равна 2, т. е. $T_и = 2(t_и - t_{ф1})$

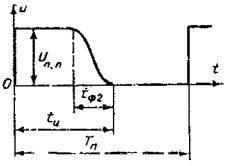


$$N_{i2} = \left(\exp\frac{t_{ф1}}{\tau_i} + 1\right)^2 \times$$

$$\times\left(\exp\frac{t_и - t_{ф1}}{\tau_i} - 1\right) / 4\left(1 + \frac{t_{ф1}^2}{\pi^2\tau_i^2}\right)^2 \times$$

$$\times\left(\exp\frac{t_и}{\tau_i}\right)\left(\exp\frac{t_и - t_{ф1}}{\tau_i} + 1\right)$$

6. Та же, что и в п. 3, но $t_{\phi 1}=0$



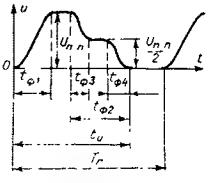
$$N_{i2}=\frac{1}{4\left(\exp\frac{T_{\text{и}}}{\tau_i}-1\right)^2}\times$$

$$\times\left\{2\left[\exp\left(-\frac{t_{\text{и}}}{\tau_i}\right)\left(\exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}+1\right)-2\right]+\right.$$

$$+\frac{\pi^2\tau_i^2\left[1+\exp\left(-\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}\right)\right]}{\left(t_{\phi 2}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[2\exp\frac{t_{\text{и}}}{\tau_i}-\left(\exp\frac{t_{\text{и}}}{\tau_i}+1\right)\right]-\frac{t_{\phi 2}^2\left(\exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}+1\right)}{\left(t_{\phi 2}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\times$$

$$\left.\times\left[\pi^2\tau_i^2\left(1+\exp-\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}\right)-2\left(t_{\phi 2}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\exp\left(-\frac{t_{\text{и}}}{\tau_i}\right)\right]\right\}$$

7. Сложная, характерная для конденсаторов формирующей линии импульсного модулятора



$$N_{i2}=\frac{\pi^2\tau_i^2}{8\left(\exp\frac{T_{\text{и}}}{\tau_i}-1\right)}\times$$

$$\times\left\{\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)}{\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\times\right.$$

$$\times\left[\frac{\exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}\left(\exp\frac{t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)\cdot\left(\exp\frac{t_{\phi 4}}{\tau_i}+1\right)}{\exp\frac{t_{\text{и}}}{\tau_i}}-\frac{2\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)}{\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}}\right]+\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)}{2\left(t_{\phi 3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\times$$

$$\times\left[\frac{2\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi 1}}{\tau_i}\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)-\left(\exp\frac{t_{\phi 4}}{\tau_i}+1\right)}{\exp\frac{t_{\phi 4}}{\tau_i}}-\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)}{\exp\frac{t_{\phi 3}}{\tau_i}}\right]+$$

$$+\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 4}}{\tau_i}+1\right)}{2\left(t_{\phi 4}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[\frac{2\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi 1}}{\tau_i}\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)-\exp\frac{t_{\phi 2}-t_{\phi 3}}{\tau_i}\left(\exp\frac{t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)}{\exp\frac{t_{\phi 4}}{\tau_i}}-\right.$$

$$\left.-\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 4}}{\tau_i}+1\right)}{\exp\frac{t_{\phi 4}}{\tau_i}}\right]-\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)}{\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{\phi 3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[t_{\phi 1}^2\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi 1}-t_{\phi 2}}{\tau_i}+\right.$$

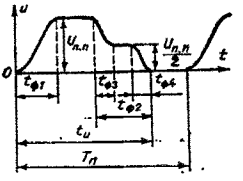
$$\left.+t_{\phi 3}^2\exp\left(-\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi 2}-t_{\phi 3}}{\tau_i}\right)\right]-\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi 4}}{\tau_i}+1\right)}{\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{\phi 1}^2-\pi^2\tau_i^2\right)}\left[t_{\phi 1}^2\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi 1}-t_{\phi 4}}{\tau_i}+\right.$$

$$\left.+t_{\phi 4}^2\exp\left(-\frac{t_{\text{и}}}{\tau_i}\right)\right]+\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi 4}}{\tau_i}+1\right)}{2\left(t_{\phi 3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{\phi 4}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[t_{\phi 3}^2\exp\frac{t_{\phi 2}-t_{\phi 3}-t_{\phi 4}}{\tau_i}+\right.$$

$$\left.+t_{\phi 1}^2\exp\left(-\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}\right)\right]+\frac{2t_{\phi 1}^2\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)^2}{\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}}+\frac{t_{\phi 3}^2\left(\exp\frac{t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)^2}{2\left(t_{\phi 3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2\exp\frac{t_{\phi 3}}{\tau_i}}+$$

$$+\frac{t_{\phi 1}^2\left(\exp\frac{t_{\phi 4}}{\tau_i}+1\right)^2}{2\left(t_{\phi 4}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2\exp\frac{t_{\phi 4}}{\tau_i}}\Bigg\}$$

8. Та же, что и в п. 7, но $t_{\phi 3}=t_{\phi 4}$



$$N_{i2}=\frac{\pi^2\tau_i^2}{8\left(\exp\frac{T_n}{\tau_i}-1\right)}\times$$

$$\times\left\{\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)}{\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\times\right.$$

$$\times\left[\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}+1\right)}{\exp\frac{t_n}{\tau_i}}-\frac{2\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)}{\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}}\right]+\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)^2}{2\left(t_{\phi 3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\times$$

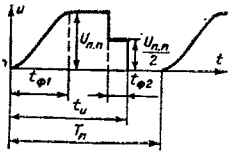
$$\times\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 2}-t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)}{\exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}}\left[\frac{2\exp\frac{t_n-t_{\phi 1}}{\tau_i}\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)}{\left(\exp\frac{t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)}-\left(\exp\frac{t_{\phi 2}-t_{\phi 3}}{\tau_i}\right)\right]-$$

$$-\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)\left(\exp\frac{t_{\phi 2}-t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)}{\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)\left(t_{\phi 3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[t_{\phi 1}^2\exp\frac{t_n-t_{\phi 1}-t_{\phi 2}}{\tau_i}+\right.$$

$$\left.+t_{\phi 3}^2\exp\left(-\frac{t_n}{\tau_i}\right)\right]+\frac{t_{\phi 3}^2\left(\exp\frac{t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)^2\left(\exp\frac{t_{\phi 2}-t_{\phi 3}}{\tau_i}+1\right)^2}{2\left(t_{\phi 3}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2\exp\frac{t_{\phi 2}-2t_{\phi 3}}{\tau_i}}+$$

$$\left.+\frac{2t_{\phi 1}^2\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)^2}{\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)^2\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}}\right\}$$

9. Та же, что и в п. 7, но $t_{\phi 3}=t_{\phi 4}=0$



$$N_{i2}=\frac{1}{4\left(\exp\frac{T_n}{\tau_i}-1\right)}\times$$

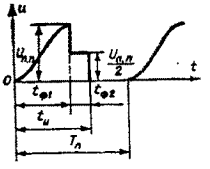
$$\times\left\{\frac{\pi^2\tau_i^2\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)}{\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\times\right.$$

$$\times\left[\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}+1\right)}{\exp\frac{t_n}{\tau_i}}-\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)}{\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}}\right]+\left[1+\exp\left(-\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}\right)\right]\left[\exp\frac{t_n-t_{\phi 1}}{\tau_i}\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)-\right.$$

$$\left.-\left(\exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}+1\right)\right]+\frac{t_{\phi 1}^2\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)}{\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[\frac{\pi^2\tau_i^2\left[1+\exp\left(-\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}\right)\right]}{\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}-\right.$$

$$-\left(\exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}+1\right)\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi 1}-t_{\phi 2}}{\tau_i}\Bigg]\Bigg\}$$

10. Та же, что и в п. 9, но $t_{\text{и}}=t_{\phi 1}+t_{\phi 2}$



$$N_{i2}=\frac{1}{4\left(\exp\frac{T_{\text{п}}}{\tau_i}-1\right)}\times$$

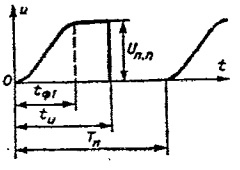
$$\times\left\{\frac{\pi^2\tau_i^2\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)}{\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\times\right.$$

$$\times\left[\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}+1\right)}{\exp\frac{t_{\text{и}}}{\tau_i}}-\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)}{\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}}\right]+\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}+1\right)^2}{\exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}}\times$$

$$\times\left[\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)\exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}}{\exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}+1}-1\right]+\frac{t_{\phi 1}^2\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)}{\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\left[\frac{\pi^2\tau_i^2\left[1+\exp\left(-\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}\right)\right]}{\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}-\right.$$

$$\left.\left.-\left(\exp\frac{t_{\phi 2}}{\tau_i}+1\right)\right]\right\}$$

11. Та же, что и в п. 9, но $t_{\phi 2}=0$



$$N_{i2}=\frac{1}{4\left(\exp\frac{T_{\text{п}}}{\tau_i}-1\right)}\times$$

$$\times\left\{\frac{\pi^2\tau_i^2\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)}{\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\times\right.$$

$$\times\left[2\exp\left(-\frac{t_{\text{и}}}{\tau_i}\right)-\frac{\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)}{\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}}\right]+2\left[\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi 1}}{\tau_i}\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)-2\right]+$$

$$\left.+\frac{t_{\phi}^2\left(\exp\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}+1\right)}{\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}\times\left[\frac{\pi^2\tau_i^2\left[1+\exp\left(-\frac{t_{\phi 1}}{\tau_i}\right)\right]}{\left(t_{\phi 1}^2+\pi^2\tau_i^2\right)}-2\exp\frac{t_{\text{и}}-t_{\phi 1}}{\tau_i}\right]\right\}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Тепловые параметры конденсаторов типа К40У-9, К42У-2, К71-4, К71-5, К72-11, К72П-6, К73-9, К73-11, К73-15, К73-16, К75-10, К75-12, К75-24, К76П-1, К77-1

Таблица 3.1

Номинальное напряжение, В	Номинальная емкость, мкФ	Полное среднее тепловое сопротивление $R_{т.с}$, К/Вт	Тепловая постоянная времени $\tau_т$, мин
	К40У-9		
200	0,00047	118	3
	0,00068		
	0,001		
	0,0015		
	0,0022		
	0,0033		3,2
	0,0047		3,3
	0,0068	117	3,4
	0,01	112	3,5
	0,033	90	4,1
	0,047	84	4,5
	0,068	75	4,9
	0,10	65	5,4
	0,15	55	6,0
	0,22	48	7,0
	0,33	39	8,0
	0,47	35	9,0
	0,68	30	10,0
	1,00	25	11,3
400	0,0047	112	3,5
	0,0068	109	3,8
	0,015	95	4,2
	0,022	86	4,5
	0,033	75	5,0
	0,047	69	5,5
	0,068	60	6,0
	0,10	51	6,9
	0,15	43	7,6
	0,22	38	8,7
	0,33	30	9,8
	0,47	27	11,2
	0,68	24	12,2
630	0,00047		3,6
	0,00068		
	0,001		
	0,0015	113	3,7
	0,0022		3,8
	0,0033	109	4,0
	0,0047	102	4,1
	0,0068	93	4,4
	0,01	85	4,7
	0,015	77	5,0
	0,022	69	5,5
	0,033	60	6,0
	0,047	54	6,8
	0,068	48	7,5
	0,10	40	8,3
	0,15	35	9,2
	0,22	30	10,4
	0,33	25	11,7
	0,47	21	13,0
1000	0,001	73	6,0
	0,0015		
	0,0022		
	0,0033		
	0,0047		
	0,0068	70	
	0,01	67	
	0,015	60	6,2
	0,022	54	6,5
	0,033	47	7,1
	0,047	42	7,8
	0,068	38	8,8
	0,10	31	9,7
	0,15	28	10,9
	0,22	25	12,2
	К42У-2		
160	0,047	138	5,0
	0,10	109	5,2
	0,15	98	5,5
	0,22	89	5,9
	0,33	78	6,2
	0,47	62	7,0
	1,00	55	8,8
250	0,047	108	5,0
	0,068	100	5,4
	0,10	90	5,8
	0,15	80	6,2
	0,22	73	6,8
	0,33	64	7,5
	0,47	54	8,5
	1,00	42	10,5
400	0,033	100	5,8
	0,047	91	5,9
	0,068	82	6,2
	0,10	74	6,7
	0,15	65	7,3
	0,22	58	8,2
	0,33	50	9,5
	0,47	43	11,0
630	0,015	105	5,0
	0,022	97	5,3
	0,033	87	5,8
	0,047	78	6,1
	0,068	69	6,7
	0,10	61	7,5
	0,15	52	9,0
	0,22	45	11,0
	0,01	86	6,0
	0,015	86	6,0
	0,022	85	6,1

Номинальное напряжение, В	Номинальная емкость, мкФ	Полное среднее тепловое сопротивление $R_{т\cdot с}$, К/Вт	Тепловая постоянная времени $\tau_т$, мин
1000	0,033	77	6,4
	0,047	68	7,0
	0,068	60	7,9
	0,10	52	9,4
	0,15	45	11,3
	0,22	38	13,2
1600	0,0047	86	6,0
	0,0068	86	6,0
	0,01	84	6,2
	0,015	78	6,6
	0,022	69	7,2
	0,033	60	8,5
	0,047	53	9,8
	0,068	45	11,9
	0,10	39	14,0
К71-4			
160	1,2	39	8,0
	1,5	35	8,4
	1,8	31	8,8
	2,2	28	9,2
	2,7	25	10,0
	3,3	22	11,0
	3,9	20	12,0
	4,7	18	13,0
	5,6	18	14,5
	6,8	17	16,0
	8,2	16	17,0
	10,0	15	19,5
250	0,010	140	3,0
	0,012	132	3,0
	0,015	129	3,0
	0,018	125	3,0
	0,022	120	3,0
	0,027	115	3,1
	0,033	110	3,2
	0,039	105	3,3
	0,047	100	3,3
	0,056	97	3,4
	0,068	95	3,5
	0,082	90	3,5
	0,10	85	3,6
	0,12	80	3,7
	0,15	77	3,9
	0,18	72	4,0
	0,22	68	4,1
	0,27	65	4,4
	0,33	60	4,7
	0,39	58	5,0
	0,47	52	5,2
	0,56	50	5,5
	0,68	48	6,0
	0,82	45	6,5
	1,00	40	7,0
К71-5			
	0,01	140	3,0
	0,012	132	3,0
	0,015	129	3,0
	0,018	125	3,0
	0,022	120	3,0
	0,027	115	3,1

Номинальное напряжение, В	Номинальная емкость, мкФ	Полное среднее тепловое сопротивление $R_{т\cdot с}$, К/Вт	Тепловая постоянная времени $\tau_т$, мин
160	0,033	110	3,2
	0,039	105	3,3
	0,047	100	3,3
	0,056	97	3,4
	0,068	95	3,5
	0,082	90	3,5
	0,10	85	3,6
	0,12	80	3,7
	0,15	77	3,9
	0,18	72	4,0
	0,22	68	4,1
	0,27	65	4,4
	0,33	60	4,7
	0,39	58	5,0
	0,47	52	5,2
	0,56	50	5,5
	0,68	48	6,0
	0,82	45	6,5
	1,00	40	7,0
К72-11			
125	1,0	13,2	27
	2,2	10,5	33
	3,3	9,0	37
	4,7	7,8	40
250	0,47	13,2	27
	1,0	10,8	33
	2,2	8,2	40
	3,3	6,9	44
500	0,22	12,6	28
	0,33	11,0	32
	0,47	9,4	35
	1,00	6,4	41
750	0,10	11,8	30
	0,22	8,5	37
	0,33	6,9	41
	0,47	5,5	43
1000	0,047	13,0	35
	0,100	9,9	41
	0,22	6,4	48
К72П-6			
200	0,00047	86	5,0
	0,00056	86	5,0
	0,00068	86	5,5
	0,00082	86	6,0
	0,0010	85	6,0
	0,0012	82	6,5
	0,0015	80	7,0
	0,0018	78	7,2
	0,0022	72	7,5
	0,0027	70	7,5
	0,0033	69	7,5
	0,0039	64	7,7
	0,0047	62	8,0
	0,0056	59	8,2
	0,0068	56	8,5
	0,0082	53	8,6
	0,010	52	8,9
	0,012	48	9,0

Номинальное напряжение, В	Номинальная емкость, мкФ	Полное среднее тепловое сопротивление $R_{т\cdot с}$, К/Вт	Тепловая постоянная времени $\tau_т$, мин
	0,015	45	9,0
	0,018	42	9,2
	0,022	39	9,8
	0,027	37	10,0
	0,033	35	10,0
	0,039	32	10,0
	0,047	30	10,5
	0,056	28	11,0
	0,068	26	11,5
	0,082	24	12,0
	0,10	21	13,0
	0,15	18	15,0
	0,22	15	19,0
	0,33	12	25,0
	0,47	10	30,0
	0,68	9	38,0
	1,00	9	49,0
500	0,00047	86	5,0
	0,00056	86	5,2
	0,00068	85	5,5
	0,00082	81	5,7
	0,0010	79	6,0
	0,0012	74	6,3
	0,0015	70	6,5
	0,0018	68	6,7
	0,0022	63	6,8
	0,0027	60	7,0
	0,0033	58	7,4
	0,0039	54	7,7
	0,0047	52	8,0
	0,0056	49	8,2
	0,0068	45	8,5
	0,0082	41	8,8
	0,010	39	9,0
	0,012	36	9,5
	0,015	34	10,0
	0,018	31	10,2
	0,022	29	10,6
	0,027	27	11,0
	0,033	25	11,5
	0,039	22	12,2
	0,047	20	13,0
	0,056	19	14,0
	0,068	18	14,5
	0,082	17	15,5
	0,10	16	17,0
	0,15	14	20,0
	0,22	12	24,0
	0,33	10	31,0
	0,47	9	40,0
	0,00047	50	7,0
	0,00056	50	7,2
	0,00068	50	7,5
	0,00082	50	7,7
	0,0010	50	8,0
	0,0012	50	8,2
	0,0015	48	8,5
	0,0018	45	8,6
	0,0022	42	8,8
	0,0027	40	9,0
	0,0033	39	9,2
	0,0039	37	9,5
	0,0047	36	10,0
1000	0,0056	35	10,2
	0,0068	33	10,4
	0,0082	32	10,7
	0,010	30	11,0
	0,012	27	11,5
	0,015	26	12,0
	0,018	24	12,5
	0,022	22	13,0
	0,027	21	13,5
	0,033	20	13,8
	0,039	18	14,3
	0,047	17	15,0
	0,056	16	16,0
	0,068	14	17,0
	0,082	13	18,0
	0,10	12	19,0
	0,15	11	24,0
	0,22	10	29,0
	0,33	9	38,0
	0,47	9	48,0
1600	0,00047	40	8,5
	0,00056	40	8,6
	0,00068	40	8,7
	0,00082	40	8,8
	0,0010	40	9,0
	0,0012	40	9,5
	0,0015	38	9,8
	0,0018	37	10,0
	0,0022	35	10,0
	0,0027	33	10,2
	0,0033	31	10,5
	0,0039	30	11,0
	0,0047	29	11,0
	0,0056	28	11,3
	0,0068	25	11,5
	0,0082	23	11,7
	0,010	22	12,0
	0,012	21	13,0
	0,015	20	14,0
	0,018	19	14,5
	0,022	17	15,0
	0,027	16	15,5
	0,033	15	16,0
	0,039	14	17,0
	0,047	12	18,5
	0,056	11	19,5
	К73-9		
	0,0010	144,0	0,40
	0,0012	144,0	0,40
	0,0015	144,0	0,40
	0,0018	144,0	0,40
	0,0022	144,0	0,40
	0,0027	144,0	0,40
	0,0033	144,0	0,42
	0,0039	143,0	0,44
	0,0047	142,0	0,45
	0,0056	139,0	0,43
	0,0068	135,0	0,50
	0,0082	132,0	0,52
	0,010	128,5	0,55
	0,012	124,0	0,60

Номинальное напряжение, В	Номинальная емкость, мкФ	Полное среднее тепловое сопротивление $R_{т \cdot с}$, К/Вт	Тепловая постоянная времени $\tau_т$, мин
100	0,015	120,0	0,70
	0,018	116,0	0,75
	0,022	113,0	0,80
	0,027	109,0	0,83
	0,033	104,0	0,90
	0,039	99,0	0,95
	0,047	90,0	1,10
	0,056	87,0	1,15
	0,068	83,0	1,20
	0,082	79,0	1,30
	0,10	76,0	1,40
	0,12	71,0	1,50
	0,15	67,5	1,60
	0,18	62,0	1,70
	0,22	59,0	1,80
	0,27	55,0	1,90
	0,33	53,0	2,05
	0,39	51,0	2,10
	0,47	49,0	2,15
200	0,0027	134,0	0,55
	0,0033	134,0	0,58
	0,0039	132,0	0,62
	0,0047	130,0	0,65
	0,0056	128,0	0,68
	0,0068	124,0	0,70
	0,0082	118,0	0,75
	0,010	114,0	0,80
	0,012	109,0	0,90
	0,015	104,0	0,95
	0,018	100,0	1,05
	0,022	95,0	1,10
	0,027	92,0	1,15
	0,033	86,0	1,25
	0,390	81,0	1,32
	0,047	74,0	1,40
	0,056	70,5	1,50
	0,068	69,0	1,55
	0,082	66,0	1,70
	0,10	64,0	1,75
	0,12	60,0	1,90
	0,15	56,0	2,05
	0,18	52,0	2,10
	0,22	50,0	2,25
	0,27	48,0	2,35
	0,33	45,0	2,40
400	0,0010	135,0	0,50
	0,0012	135,0	0,52
	0,0015	134,0	0,55
	0,0018	133,0	0,58
	0,0022	130,0	0,60
	0,0027	129,0	0,62
	0,0033	125,0	0,67
	0,0039	120,0	0,71
	0,0047	117,0	0,75
	0,0056	113,0	0,80
	0,0068	109,0	0,90
	0,0082	104,0	0,95
	0,010	100,0	1,00
	0,012	95,0	1,10
	0,015	90,0	1,20
	0,018	88,0	1,25
	0,022	83,0	1,35
	0,027	79,0	1,42
	0,033	75,0	1,50
	0,039	69,0	1,60
	0,047	62,0	1,70
	0,056	60,0	1,80
	0,068	58,0	1,95
	0,082	55,0	2,10
	0,100	54,0	2,25
	0,120	51,0	2,40
	0,150	49,0	2,60
630	0,00047	135,0	0,50
	0,00056	135,0	0,50
	0,00068	134,0	0,50
	0,00082	132,0	0,52
	0,0010	130,0	0,55
	0,0012	128,0	0,60
	0,0015	124,0	0,63
	0,0018	121,0	0,65
	0,0022	117,0	0,70
	0,0027	112,0	0,72
	0,0033	109,0	0,75
	0,0039	105,0	0,85
	0,0047	101,0	0,90
	0,0056	98,5	0,95
	0,0068	95,0	1,05
	0,0082	90,0	1,10
	0,010	87,5	1,20
	0,012	83,0	1,30
	0,015	79,0	1,40
	0,018	77,0	1,47
	0,022	73,0	1,58
	0,027	70,0	1,70
	0,033	66,0	1,75
	0,039	61,0	1,90
	0,047	55,0	2,10
	0,056	52,0	2,20
	0,068	50,0	2,30
	0,082	46,0	2,50
	0,100	44,0	2,70
К73-11			
160	2,700	50	5,5
	3,300	43	6,0
	3,900	40	6,5
	4,700	38	7,0
	5,600	35	7,6
	6,800	31	8,3
250	0,047	168	2,0
	0,056	160	2,2
	0,068	152	2,3
	0,082	135	2,4
	0,100	140	2,5
	0,120	135	2,6
	0,15	130	2,7
	0,18	120	2,9
	0,22	118	3,0
	0,27	110	3,3
	0,33	104	3,5
	0,39	95	3,7
	0,47	92	4,0
	0,56	90	4,1
	0,68	82	4,4
	0,82	78	4,8
	1,00	72	5,0

Номинальное напряжение, В	Номинальная емкость, мкФ	Полное среднее тепловое сопротивление $R_{с\text{-}т}$, К/Вт	Тепловая постоянная времени $\tau_т$, мин
	1,20	70	5,5
	1,50	62	5,9
	1,80	58	6,2
	2,20	55	6,4
	0,022	180	2,5
	0,027	170	2,6
	0,033	162	2,7
	0,039	155	2,7
	0,047	150	2,8
	0,056	143	2,9
	0,068	137	3,0
	0,082	130	3,2
	0,10	128	3,4
400	0,12	118	3,5
	0,15	110	3,7
	0,18	105	4,0
	0,22	100	4,1
	0,27	95	4,3
	0,33	90	4,5
	0,39	85	4,8
	0,47	77	5,0
	0,56	72	5,2
	0,68	68	5,4
	0,82	63	5,8
	1,00	58	6,0
	0,0010	170	2,0
	0,0012	170	2,0
	0,0015	170	2,0
	0,0018	170	2,0
	0,0022	170	2,0
	0,0027	170	2,0
	0,0033	170	2,0
	0,0039	170	2,0
	0,0047	170	2,0
	0,0056	170	2,2
	0,0068	170	2,3
630	0,0082	167	2,35
	0,010	165	2,4
	0,012	160	2,45
	0,015	158	2,5
	0,018	155	2,6
	0,022	150	2,7
	0,027	145	2,9
	0,033	140	3,0
	0,039	135	3,2
	0,047	128	3,3
	0,056	122	3,4
	0,068	115	3,5
	0,082	108	3,7
	0,10	100	4,0
	0,12	95	4,2
	0,15	90	4,4
	0,18	82	4,6
	0,22	79	4,8
	0,27	71	5,0
	0,33	67	5,2
	0,39	61	5,4
	0,47	58	5,5

Номинальное напряжение, В	Номинальная емкость, мкФ	Полное среднее тепловое сопротивление $R_{т\text{-}с}$, К/Вт	Тепловая постоянная времени $\tau_т$, мин
	К73-15		
	0,015	115	0,8
	0,022	110	0,9
	0,033	102	1,1
	0,047	95	1,2
100	0,068	91	1,3
	0,10	79	1,65
	0,15	70	2,0
	0,22	60	2,35
	0,33	52	2,7
	0,47	45	3,4
	0,0047	120	0,67
	0,0068	120	0,75
	0,010	116	0,80
	0,015	109	0,92
	0,022	100	1,10
	0,033	93	1,30
160	0,047	87	1,40
	0,068	82	1,80
	0,10	70	2,00
	0,15	60	2,35
	0,22	52	2,70
	0,33	43	3,00
	0,0033	120	0,75
	0,0047	115	0,80
	0,0068	110	1,00
	0,100	104	1,08
250	0,015	95	1,20
	0,022	87	1,40
	0,033	80	1,68
	0,047	75	1,90
	0,068	65	2,20
	0,10	57	2,40
	0,15	48	2,75
	0,22	40	3,20
	0,0022	120	0,70
	0,0033	114	0,85
	0,0047	109	0,95
	0,0068	102	1,10
	0,010	96	1,30
	0,015	87	1,50
400	0,022	80	1,60
	0,033	70	1,95
	0,047	65	2,10
	0,068	55	2,55
	0,10	50	2,70
	0,15	40	3,05
	0,22	34	3,25
	0,00047	120	0,65
	0,00068	120	0,65
	0,00100	119	0,70
	0,0015	118	0,75
	0,0022	114	0,80
	0,0033	108	1,00
	0,0047	100	1,10
	0,0068	90	1,30
	0,010	86	1,50
630	0,015	77	1,75
	0,022	72	1,90
	0,033	62	2,25

Номинальное напряжение, В	Номинальная емкость, мкФ	Полное среднее тепловое сопротивление $R_{т\cdot с}$, К/Вт	Тепловая постоянная времени $\tau_т$, мин
	0,047	58	2,50
	0,068	48	2,80
	0,10	40	3,05
	0,15	33	3,30
	К73-16		
	0,10	150	3,00
	0,12	144	3,10
	0,15	139	3,15
	0,18	132	3,20
	0,22	128	3,25
	0,27	120	3,30
	0,33	116	3,40
	0,39	110	3,45
	0,47	109	3,50
	0,56	104	3,60
	0,68	100	3,70
	0,82	94	3,80
	1,0	90	3,90
63	1,2	85	4,00
	1,5	80	4,00
	1,8	75	4,20
	2,2	70	4,30
	2,7	67	4,50
	3,3	60	4,70
	3,9	57	4,85
	4,7	55	5,00
	5,6	50	5,30
	6,8	48	5,50
	8,2	45	6,00
	10,0	40	6,50
	12,0	37	7,00
	15,0	35	7,90
	18,0	34	8,60
	22,0	30	9,80
	0,10	140	3,00
	0,12	136	3,10
	0,15	130	3,15
	0,18	125	3,20
	0,22	120	3,25
	0,27	116	3,30
	0,33	114	3,40
	0,39	105	3,45
	0,47	100	3,50
	0,56	95	3,60
	0,68	90	3,70
100	0,82	85	3,80
	1,0	80	3,90
	1,2	75	4,00
	1,5	70	4,20
	1,8	66	4,40
	2,2	62	4,70
	2,7	60	4,90
	3,3	55	5,20
	3,9	50	5,50
	4,7	47	5,90
	5,6	42	6,30
	6,8	40	6,90
	8,2	35	7,50
	10,0	32	8,40
	12,0	30	9,30
	0,047	144	3,40
	0,056	138	3,40
	0,068	134	3,45
	0,082	128	3,45
	0,10	122	3,50
	0,12	117	3,55
	0,15	110	3,60
	0,18	107	3,65
	0,22	102	3,70
	0,27	98	3,75
160	0,33	93	3,8
	0,39	89	3,85
	0,47	84	3,9
	0,56	80	3,95
	0,68	75	4,0
	0,82	70	4,1
	1,00	68	4,2
	1,20	63	4,4
	1,50	60	4,6
	1,80	55	4,8
	2,20	52	5,0
	2,70	50	5,4
	3,30	45	6,0
	3,90	40	6,4
	4,70	38	7,0
	5,60	35	7,5
	6,80	30	8,5
	0,047	130	4,0
	0,056	125	4,0
	0,068	120	4,0
	0,082	115	4,0
	0,10	110	4,0
	0,12	105	4,0
	0,15	98	4,0
	0,18	94	4,0
	0,22	90	4,0
250	0,27	85	4,0
	0,33	79	4,1
	0,39	75	4,15
	0,47	70	4,20
	0,56	67	4,30
	0,68	64	4,40
	0,82	58	4,50
	1,00	54	4,70
	1,20	50	5,00
	1,50	47	5,50
	1,80	42	6,00
	2,20	40	6,50
	0,022	140	4,00
	0,027	135	4,00
	0,033	130	4,05
	0,039	124	4,10
400	0,047	118	4,10
	0,056	115	4,15
	0,068	110	4,20
	0,082	105	4,20
	0,10	100	4,25
	0,12	95	4,25
	0,15	90	4,30
	0,18	84	4,30
	0,22	78	4,35
	0,27	73	4,40
	0,33	70	4,45
	0,39	65	4,50

Номинальное напряжение, В	Номинальная емкость, мкФ	Полное среднее тепловое сопротивление $R_{т\text{-}с}$, К/Вт	Тепловая постоянная времени $\tau_т$, мин
	0,47	60	4,60
	0,56	58	4,70
	0,68	55	4,90
	0,82	50	5,00
	1,00	46	5,30
630	0,010	150	4,20
	0,012	142	4,20
	0,015	137	4,20
	0,018	130	4,20
	0,022	127	4,20
	0,027	120	4,20
	0,033	114	4,20
	0,039	108	4,25
	0,047	102	4,30
	0,056	97	4,35
	0,068	93	4,40
	0,082	88	4,40
	0,10	82	4,45
	0,12	78	4,50
	0,15	73	4,55
	0,18	69	4,60
	0,22	65	4,70
	0,27	59	4,80
	0,33	55	4,90
	0,39	50	5,00
	0,47	47	5,10
1000	0,010	100	4,20
	0,012	100	4,20
	0,015	96	4,20
	0,018	93	4,20
	0,022	90	4,20
	0,027	85	4,30
	0,033	80	4,40
	0,039	75	4,45
	0,047	70	4,50
	0,056	65	4,60
	0,068	61	4,75
	0,082	57	4,90
	0,10	54	5,00
	0,12	50	5,30
	0,15	45	5,80
	0,18	40	6,00
	0,22	38	6,50
1600	0,0047	100	4,20
	0,0056	100	4,20
	0,0068	97	4,20
	0,0082	95	4,20
	0,010	90	4,20
	0,012	85	4,20
	0,015	80	4,25
	0,018	75	4,25
	0,022	70	4,30
	0,0027	65	4,40
	0,0330	60	4,55
	0,039	56	4,80
	0,047	52	5,00
	0,056	50	5,30
	0,068	46	5,50
	0,082	41	6,00
	0,10	39	6,80

Номинальное напряжение, В	Номинальная емкость, мкФ	Полное среднее тепловое сопротивление $R_{т\text{-}с}$, К/Вт	Тепловая постоянная времени $\tau_т$, мин
	К75-10		
250	0,10	70	4,00
	0,15	64	4,50
	0,22	55	5,00
	0,33	48	6,00
	0,47	42	7,00
	0,68	37	8,50
	1,00	32	10,00
	1,50	27	12,00
	2,20	23	14,00
	3,30	20	17,00
	4,70	17	20,00
	6,80	15	24,00
	10,0	13	30,00
500	0,10	40	8,00
	0,15	34	9,00
	0,22	30	10,0
	0,33	27	11,5
	0,47	24	13,0
	0,68	21	15,0
	1,00	19	19,0
	1,50	16	24,0
	2,20	15	26,5
	3,30	12	33,0
750	0,10	30	10,5
	0,15	25	12,0
	0,22	22	14,5
	0,33	20	16,0
	0,47	18,5	19,0
	0,68	18	22,0
	1,00	17	28,5
	1,50	16,5	35,0
1000	0,10	24	11,0
	0,15	20	14,0
	0,22	17	18,5
	0,33	15	23,0
	0,47	14	28,0
	0,68	12	35,0
	1,00	11	42,0
	К75-12		
400	0,0033	112	4,0
	0,0047	108	4,5
	0,010	100	5,0
	0,015	95	5,0
	0,022	85	5,0
	0,033	75	5,0
	0,047	68	5,2
	0,068	58	5,5
	0,10	50	6,0
	0,15	44	6,5
	0,22	37	7,0
	0,33	31	8,0
	0,47	28	10,0
	1,0	20	13,0
	2,0	17	18,0
	4,0	15	26,0
	6,0	12	33,0
	8,0	10	37,0
	10,0	8	40,0
	0,001	112	4,0

Номинальное напряжение, В	Номинальная емкость, мкФ	Полное среднее тепловое сопротивление $R_{т\cdot с}$, К/Вт	Тепловая постоянная времени $\tau_т$, мин
630	0,0015	110	4,1
	0,0022	108	4,2
	0,0033	99	4,4
	0,0047	93	4,5
	0,0068	86	4,6
	0,010	76	4,7
	0,022	70	4,8
	0,033	55	5,0
	0,047	50	5,5
	0,068	45	6,0
	0,10	38	7,0
	0,15	32	7,5
	0,22	28	8,0
	0,33	25	10,0
	1,00	18	16,0
	2,00	13	24,0
	4,00	11	32,0
	6,00	10	38,0
	8,00	9	40,0
1000	0,0022	80	4,2
	0,0033	77	4,2
	0,0047	75	4,4
	0,0068	70	4,5
	0,010	65	4,7
	0,015	61	5,0
	0,022	55	5,2
	0,033	50	5,5
	0,047	45	6,2
	0,068	40	7,0
	0,10	32	8,0
	0,15	28	9,0
	0,22	24	10,0
	0,50	15	15,0
	1,00	14	20,0
	2,00	10	29,0
	4,00	9	36,0
	6,00	8	41,0
1600	0,010	50	5,0
	0,015	50	5,0
	0,022	45	5,5
	0,033	39	6,0
	0,047	35	7,0
	0,068	30	8,0
	0,10	26	10,0
	0,25	19	14,0
	0,50	15	18,0
	1,00	11	24,0
	2,00	9	33,0
	4,00	8	40,0
К75-24			
400	0,10	84	4,0
	0,15	75	4,0
	0,22	69	4,0
	0,33	60	4,5
	0,47	54	5,0
	0,68	49	5,5
	1,00	41	6,5
	1,50	35	8,0
	2,20	30	10,0
	3,30	28	12,0
	4,00	24	13,0
	6,00	20	0'91
	8,00	18	18,0
	10,00	18	19,0
630	0,10	75	4,0
	0,15	65	4,0
	0,22	58	4,5
	0,33	49	5,2
	0,47	43	6,0
	0,68	38	7,5
	1,00	31	10,0
	1,50	28	12,5
	2,20	24	15,0
	3,30	22	17,0
	4,00	19	18,5
	4,70	18	20,0
	6,00	17,5	23,0
	8,00	15	26,0
	10,00	14	28,0
1000	0,10	54	5,0
	0,15	65	6,0
	0,22	40	7,0
	0,33	35	8,0
	0,47	30	9,0
	0,68	28	11,0
	1,00	25	13,0
	1,50	21	15,0
	2,20	19	18,0
	4,00	16	24,0
	6,00	14	30,0
	8,00	12	35,0
	10,00	11	40,0
1600	0,10	42	5,0
	0,15	36	6,2
	0,22	30	7,5
	0,33	28	9,5
	0,47	25	12,0
	0,68	22	13,2
	1,00	19	16,0
	1,50	16	18,0
	2,00	15	21,0
	4,00	12	29,0
	6,00	10	37,0
	8,00	9	45,0
	10,00	8,5	51,0
К76П-1			
63	0,47	102	4,9
	0,68	92	5,1
	1,00	83	5,4
	1,50	74	5,8
	2,20	65	6,2
	3,30	57,5	6,8
	4,70	50	7,3
	6,80	44	8,0
	10,00	39	8,9
	15,00	35	10,5
	22,00	32	12,0

Номинальное напряжение, В	Номинальная емкость, мкФ	Полное среднее тепловое сопротивление $R_{т \cdot с}$, К/Вт	Тепловая постоянная времени $\tau_т$, мин
	К77-1		
63	0,22	122	5,3
	0,27	118	5,35
	0,33	112	5,4
	0,39	108	5,5
	0,47	104	5,6
	0,56	100	5,7
	0,68	95	5,8
	0,82	90	5,9
	1,0	87	6,0
	1,2	83	6,2
	1,5	80	6,4
	1,8	75	6,7
	2,2	72	6,9
	2,7	65	7,1
	3,3	60	7,5
	3,9	55	8,2
	4,7	52	8,5
	5,6	50	8,8
	6,8	46	9,0
	8,2	43	9,5
	10,0	40	9,9
	12,0	37	10,5
	15,0	32	11,0
	18,0	30	11,7
	22,0	26	12,4
100	0,10	122	5,7
	0,12	119	5,75
	0,15	114	5,8
	0,18	110	5,85
	0,22	107	5,9
	0,27	100	6,0
	0,33	95	6,2
	0,39	90	6,3
	0,47	86	6,4
	0,56	82	6,5
	0,68	78	6,7
	0,82	73	6,9
	1,00	70	7,1
	1,20	67	7,3
	1,50	63	7,5
	1,80	59	7,8
	2,20	55	8,0
	2,70	50	8,5
	3,30	42	9,0
	3,90	37	9,8
	0,47	55	7,0
	0,56	52	7,3
	0,68	50	7,5
	0,82	45	7,8
200	1,00	42	8,3
	1,20	41	8,8
	1,50	39	9,3
	1,80	35	10,0
	2,20	34	11,0
	2,70	30	12,0
	3,30	25	13,0
	3,90	20	14,6
400	0,0010	160	5,50
	0,0012	155	5,50
	0,0015	150	5,50
	0,0018	145	5,50
	0,0022	142	5,50
	0,0027	134	5,50
	0,0033	125	5,50
	0,0039	123	5,50
	0,0047	120	5,50
	0,0056	118	5,52
	0,0068	115	5,55
	0,0082	110	5,58
	0,010	108	5,60
	0,012	104	5,70
	0,015	98	5,80
	0,018	94	5,90
	0,022	91	5,95
	0,027	88	6,00
	0,033	83	6,20
	0,039	79	6,40
	0,047	75	6,60
	0,056	71	6,8
	0,068	69	7,0
	0,082	65	7,3
	0,10	63	7,4
	0,12	61	7,7
	0,15	57	7,9
	0,18	54	8,2
	0,22	51	8,5
	0,27	46	9,0
	0,33	43	9,9
	0,39	40	10,5
	0,47	37	11,0
	0,56	33	11,6
	0,68	30	12,0
	0,82	26	12,7
	1,00	23	14,6

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Расчет стационарных тепловых полей конденсаторов

Основные обозначения и распечатка программы на языке ФОРТРАН для расчета тепловых полей конденсаторов цилиндрической формы

M1 — число узлов разностной схемы по оси r

M2 — число узлов разностной схемы по оси z

N1 — число ячеек по оси r

N2 — число ячеек по оси z

$E1—l_1$, $E2—l_2$, $E3—l$, $D1—d_1$, $D2—d_2$ (см. рис. 5.4.1)

X — массив размером M1, состоящий из координат узлов по оси r

Z — массив размером M2, состоящий из координат узлов по оси z

H1 — массив размером N1, содержащий линейные размеры ячеек по оси r

H2 — массив размером N2, содержащий линейные размеры ячеек по оси z

QM — удельная мощность тепловыделения в обкладках (q_m)

QD — начальная удельная мощность тепловыделения в диэлектрике (q_0)

AO — коэффициент теплоотдачи (α)

TK — температура корпуса ($T_к$)

T — максимальная температура (T_m)

T4 — средняя температура (T_c)

TS — внутреннее или полное тепловое сопротивление ($R_{т.вт}$, $R_{тm}$)

S1 — полная мощность тепловыделения в конденсаторе (P)

S — число итераций

T3 — абсолютная погрешность метода верхней релаксации

W — итерационный параметр

AL — стабилизирующий множитель

U — массив размером M1×M2, предназначенный для хранения и вычисления значений температур в узлах

P1 — массив размером M1×M2, состоящий из значений мощности тепловыделения в элементарных ячейках

R1, R2, R3, R4 — массивы размером M1×M2, состоящие соответственно из значений величин R^{+}_{rik}, R^{-}_{rik}, R_{zik}, γ_{ik}.

Объем используемой оперативной памяти ЭВМ серии ЕС для сетки (14×34) составляет не более 26 килобайт. На печать выдаются значения температур T_{ik} в узлах разностной сетки, максимальная температура T_m с указанием координат максимально нагретой точки, средняя температура T_c, полная мощность тепловыделения P и внутреннее или полное максимальное тепловое сопротивление $R_{т.вт}$ ($R_{тm}$).

```
      DIMENSION H1(13),
     *H2(33), X(14),
     *Z(34),U(14,34),
     1P1(14,34),R1(14,34),
     *R2(14,34),R3(14,34),
     *R4(14,34)
     2,P2(14,34)
     3,AA(14,34)
      INTEGER S,P
100   FORMAT (14F8.2)
101   FORMAT(13E9.2)
103   FORMAT(5X, 'ПОЛНАЯ
     *МОЩНОСТЬ=' F10.5)
104   FORMAT(5X, 'X=' 10F10.6)
105   FORMAT(5X, 'Z='10F10.6)
106   FORMAT(5X, 'МАКСИМАЛЬ-
     *НАЯ ТЕМПЕРАТУРА=' F7.2,5X,
     1'X=',F10.6,5X,
     *'Z=',F10.6)
107   FORMAT(5X, 'АБСОЛЮТНАЯ
     *ПОГРЕШНОСТЬ='E13.6)
108   FORMAT(5X,'СРЕДНЯЯ
     *ТЕМПЕРАТУРА='F8.2)
110   FORMAT(5X, 'ЧИСЛО
     *ИТЕРАЦИЙ=',15)
111   FORMAT(5X, 'ТЕПЛОВАЯ
     *НЕСТАБИЛЬНОСТЬ', 5X, 'S='14)
112   FORMAT(30X, 'ВНУТРЕННЕЕ
     *ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ='
     *,F10.5)
113   FORMAT(40X, 'ТЕМПЕРА
     *ТУРА КОРПУСА='F8.2)
120   FORMAT(5X, F12.8)
      P=400
      W=1.8
      N1=13
      N2=33
      M1=N1+1
      M2=N2+1
      QM=0.
      QD=0.095
      TK=29.
      AL=0.5
      E1=2.5
      E2=2.55
      E3=3.15
      D1=1.45
      D2=1.6
      D3=1.7
      AO=19.5E-4
      DO 21 I=1,11
21    H1(I)=D1/9.
      H1(N1-1)=D2-D1
      H1(N1)=0.1
      H2(2)=E3-E2
      H2(3)=E2-E1
      H2(N2-1)=E2-E1
      H2(N2)=E3-E2
      DO 25 I=4,31
25    H2(I)=E1/14.
      Z(1)=-E3
      Z(2)=Z(1)+H2(2)/2.
      DO 2 J=3,N2
2     Z(J)=Z(J-1)+(H2(J-1)+
     *H2(J))/2.
      Z(M2)=Z(N2)+H2(N2)/2.
      X(1)=-H1(2)
      X(2)=-H1(2)/2.
      DO 3 I=3,N1
3     X(I)=X(I-1)+(H1(I-1)+
     *H1(I))/2.
      X(M1)=X(N1)+H1(N1)/2.
      WRITE(3,104) X
      WRITE(3,105) Z
      DO 4 I=1,M1
      DO 4 J=1,M2
      P1(I,J)=0.
      R1(I,J)=0.
      R2(I,J)=0.
      R3(I,J)=0.
4     CONTINUE
      DO 55 I=2,N1
      DO 55 J=2,N2
      IF(X(I).LE.D1.AND,ABS.
     *(Z(J)).LE.E1) GOTO 31
      IF(X(I).LE.D1.AND.ABS
     *(Z(J)).LE.E2.AND.ABS(Z(J).
     1GT.E1) GOTO 32
      IF(ABS(Z(J)).GT.E2)
     *GOTO 33
      IF(X(I).GT.D1.AND.ABS
     *(Z(J)).LE.E2) GOTO 34
31    P1(I,J)=QM*(2.*
     *Z(J)**2/(2.*E2)**2+0.5)+QD
      R1(I,J)=1.4E-3
      R3(I,J)=7.1E-3
      GOTO 55
32    P1(I,J)=0.
      R1(I,J)=2.
      R3(I,J)=2.
      GO TO 55
33    P1(I,J)=0.
      R1(I,J)=1.6E-3
      R3(I,J)=1.6E-3
      GOTO 55
34    P1(I,J)=0.
      R1(I,J)=5.45E-4
```

```
      R3(I,J)=1.3E-3
   55 CONTINUE
      I=N1
      DO 556 J=2,N2
      R1(I,J)=2.
  556 R3(I,J)=2.
      DO 333 I=2,N1
      DO 333 J=2,N2
  333 R2(I,J)=R1(I,J)
      DO 6 I=3,N1
      DO 6 J=2,N2
      R=3.1415*((X(I)+
     *H1(I)/2.)**2-(X(I-1)+
     *H1(I-1)/2.)**2)
      R1(I,J)=H1(I)/(2.*
     *R1(I,J)*2.*3.1415*(X(I)+
     *H1(I)/4.)*H2(J))
      R2(I,J)=H1(I)/(2.*
     *R2(I,J)*2.*3.1415*(X(I)-
     *H1(I)/4.)*H2(J))
      R3(I,J)=H2(J)/(2.*
     *R3(I,J)*R)
      P1(I,J)=P1(I,J)*
     *H2(J)*R
    6 CONTINUE
      DO 56 J=2,N2
   56 R1(2,J)=R1(3,J)
      DO 66 I=1,M1
      DO 66 J=1,M2
      P2(I,J)=P1(I,J)
      U(I,J)=TK
   66 CONTINUE
      DO 883 I=1,M1
      DO 883 J=1,M2
      AA(I,J)=AO
  883 CONTINUE
      T=0
      GOTO
   83 DO 84 J=4,31
      DO 84 I=3,11
      R=3.1415*((X(I)+
     *H1(I)/2.)**2-(X(I-1)+
     *H1(I-1)/2.)**2)
      PP=P1(I,J)
      TI=U(I,J)/10.
      IF(TI.LE.11.5)P1(I,J)
     *=P2(I,J)+QD*(-3.414119E-4*
     *TI**6+1.335165E-2
     **TI**5-0.19936*TI**4+
     *1.449767*TI**3-5.147713*
     *TI**2+6.835535*
     TI+5.798755-4.2)/4.2
     1*R*H2(J)
      IF(TI.GT.11.5)P1(I,J)=
     *P2(I,J)+QD*(-2.073054E-3
     **TI**6+
     10.208451*TI**5-8.657643
     **TI**4+190.1636*TI**3-
     *2329.706*TI*2+
     215088.11*TI-40316.28-
     *4.2)/4.2
     1*R*H2(J)
      P1(I,J)=AL*P1(I,J)+
     *(1.-AL)*PP
   84 CONTINUE
   88 TB=T
      DO 60 J=2,N2
      TT=(U(N1,J)*R2(M1,J)+
     *TK*R1(N1,J))/(R2(M1,J)+
     *R1(N1,J))
      IF(U(N1,J).GT.TK)
     *AA(M1,J)=AO**SQT(SQRT)
     *(TT-TK)/20.))
     1*AL+(1.-AL)*AA(M1,J)
   60 R2(M1,J)=1./(AA(M1,J)*
     *3.1415*D3*H2(J))/2.
      DO 58 I=3,N1
      TT=(U(1,2)*R3(I,1)+TK*
     *R3(1,2))/(R3(1,1)+R3(1,2))
      WRITE(3,113) TT
   58 IF(U(I,2).GT.TK)
     *AA(I,1)=AO*SQRT(SQRT)
     *(TT-TK)/20.))
     1*AL+(1.-AL)*AA(I,1)
      DO 5 I=3,N1
      TT=(U(I,N2)*R3(I,M2)+
     *TK*R3(I,N2))/(R3(I,M2)+
     *R3(I,N2))
   59 IF(U(I,N2).GT.TK)
     *AA(I,M2)=AO*SQRT(
     *(TT-TK)/20.))-
     1*AL+(1.-AL)*AA(I,M2)
      DO 61 J=1, M2, M2
      DO 61 I=3,N1
      R=3.1415*((X(I)+H1(I)
     */2.)**2-(X(I-1)+
     *H1-I-1)/2.)**2)
   61 R3(I,J)=1./AA(I,J)*R)
      DO 8 I=3,N1
      DO 7 J=2,N2
      R4(I,J)=1./(R2(I,J)+
     *R1(I-1,J))+1./(R1(I,J)+
     R2(I+1,J))+
     21./(R3(I,J)+R3(I,J-1))+
     *1./(R3(I,J)+R3(I,J+1))
      U(I,J)=TK
    7 CONTINUE
      S=1
      T1=0.
    8 DO 9 J=2,N2
      U(2,J)+U(3,J)
      DO 9 I=3,N1
      W1=U(I,J)
      U(I,J)=(P1(I,J)+
     *U(1-1,J)/(R2(I,J)+
     *R1(I-1,J)+
     1U(I+1,J)/(R2(I+1J)+
     *R1(I,J))+
     2U(I,J-1)/(R3(I,J)+
     *R3(I,J-1))+U(I,J+1)/(R3(I,
     *J)+R3(I,J+1)))/R4(I,J)
      U(I,J)=W*U(I,J)+
     *(1.-W)*W1
    9 CONTINUE
      T=0.
      DO 68 I=1,M1
      DO 68 J=1,M2
      IF(T-U(I,J)) 69,68,68
   69 T=U(I,J)
      J1=J
      I1=I
   68 CONTINUE
      T3=ABS(T-T1)
      T1=T
      IF(T.GT.250)
     *GO TO 81
      IF(T3.LT 0,0001)
     *GO TO 10
      S=S+1
      IF(P-S) 10,8,8
   10 WRITE(3,100) U
      WRITE(3,110) S
      S1=0.
      DO 67 I=3,N1
      DO 67 J=2,N2
```

```
 67   S1=S1+P1(I,J)
      WRITE(3,103) S1
      WRITE(3,107) T3
      WRITE(3,106) T,
     *X(I1), Z(J1)
      TS=(T—TK)/S1
      WRITE(3,112) TS
      I2=0
      T4=0.
      DO 70 I=3,11
      DO 70 J=4,31
      T4=T4+U(I,J)
      I2=I2+1
 70   CONTINUE
      T4=T4/I2
      WRITE(3,108) T4
      IF(ABS(TB—T).GT.1.)
     *GOTO 83
      P=4000
      IF(ABS(TB—T).GT.0.1)
     *GOTO 83
      GO TO 82
 81   WRITE(3,111) S
 82   T=T
      END
```

Основные обозначения и распечатка программы на языке ФОРТРАН для расчета тепловых полей конденсаторов призматической формы

$M1$ — число узлов разностной схемы по оси x

$M2$ — число узлов разностной схемы по оси y

$M3$ — число узлов разностной схемы по оси z

$N1$ — число ячеек по оси x

$N2$ — число ячеек по оси y

$N3$ — число ячеек по оси z

X — массив размером M1, состоящий из координат узлов по оси x

Y — массив размером M2, состоящий из координат узлов по оси y

Z — массив размером M3, состоящий из координат узлов по оси z

H1 — массив размером N1, содержащий линейные размеры ячеек по оси x

H2 — массив размером N2, содержащий линейные размеры ячеек по оси y

H3 — массив размером N3, содержащий линейные размеры ячеек по оси z

QM — удельная мощность тепловыделения в обкладках (q_m)

QD — начальная удельная мощность тепловыделения в диэлектрике (q_0)

TK — температура корпуса ($T_к$)

T — максимальная температура (T_m)

T4 — средняя температура (T_c)

TS — внутреннее или полное тепловое сопротивление ($R_{т.вт}$, $R_{тт}$)

S1 — полная мощность тепловыделения в конденсаторе (P)

S — число итераций

T3 — абсолютная погрешность метода верхней релаксации

W — итерационный параметр

AL — стабилизирующий множитель

U — массив размером M1×M2×M3, предназначенный для хранения и вычисления значений температур в узлах

P1 — массив размером M1×M2×M3, состоящий из значений мощности тепловыделения в элементарных ячейках

R1, R2, R3, R4 — массивы размером M1×M2×M3, состоящие соответственно из значений величин $R_{xijк}$, $R_{yijк}$, $R_{zijк}$, $\gamma_{ijк}$.

Объем используемой оперативной памяти ЭВМ серии ЕС для сетки (16×12×12) составляет не более 66 килобайт. На печать выдается значение максимальной температуры T_m с указанием координат максимально нагретой точки, средняя температура T_c, полная мощность тепловыделения P и внутреннее или полное максимальное тепловое сопротивление $R_{т.вт}$ ($R_{тт}$).

```
      DIMENSION I1(13),
     *I12(33),X(14),
     *Z(34),U(14,34),
     1P1(14,34),R1(14,34),
     *R2(14,34),R3(14,34),
     *R4(14,34)
     2,P2(14,34)
     3,AA(14,34)
      INTEGER S, P
100   FORMAT(14F8.2)
101   FORMAT(13E9.2)
103   FORMAT(5X, 'ПОЛНАЯ
     *МОЩНОСТЬ='F10.5)
104   FORMAT(5X,
     *'X'10F10.6)
105   FORMAT(5X,
     *'Z='10F10.6)
106   FORMAT(5X, 'МАКСИМАЛЬ
     *НАЯ ТЕМПЕРАТУРА='F7.2,5X,
     1'X='F10.6,5X,
     *'Z='G10.6)
107   FORMAT(5X, 'АБСОЛЮТНАЯ
     *ПОГРЕШНОСТЬ='E13.6)
108   FORMAT(5X, 'СРЕДНЯЯ
     *ТЕМПЕРАТУРА='F8.2)
110   FORMAT(5X, 'ЧИСЛО
     *ИТЕРАЦИЙ='15)
111   FORMAT(5X, 'ТЕПЛОВАЯ
     *НЕСТАБИЛЬНОСТЬ', 5X, 'S='14)
112   FORMAT(30X, 'ВНУТРЕННЕЕ
     * ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕ-
     *НИЕ=',
     F10.5)
120   FORMAT(5X,F12.8)
      P=2000
      P=200
      W=1.4
      N1=13
      N2=33
      M1=N1+1
      M2=N2+1
      QM=0.
      QD=0.2
      QD=9E—2
      TK=47.
      AL=0.5
      E1=2.5
      E2=2.55
      E3=3.15
      D1=1.45
      D2=1.6
      DO 21 I=1,9
 21   H1(I)=D1/7.
      DO 22 I=10,N1
 22   H1(I)=(D2—D1)/3.
      H1(N1)=0.1
      DO 23 I=1,5
 23   H2(I)=(E3—E2)/4.
      DO 24 I=6,7
```

```
24    H2(I) = (E2—E1)/2.
      DO 25 I=8,27
25    H2(I) =E1/10.
      DO 26 I=28,29
26    H2(I) (E2—E1)/2.
      DO 27  I=30,N2
27    H2(I) = (E3—E2)/4.
      Z(1) =E3
      Z(2) =Z(1) +H2(2)/2.
      DO 2 J=3,N2
 2    Z(J) =Z(J—1) + (H2(J—1) +
     *H2(J))/2.
      Z(M2) + Z(N2) +H2(N2)/2.
      X(1) =—H1(2)
      X(2) =—H1(2)/2.
      DO 3 I=3,N1
 3    X(M1) =X(N1) +H1(N1)/2.
      WRITE(3,104) X
      WRITE(3,105) Z
      DO 4 I=1,M1
      DO 4 J=1,M2
      P1(I,J) =0.
      R1(I,J) =0.
      R2(I,J) =0.
      R3(I,J) =0.
 4    CONTINUE
      DO 55 I=2,N1
      DO 55 J=2,N2
      IF(X(I).LE.D1.AND.
     *ABS(Z(J)).LE.E1)GOTO 31
      IF(X(I).LE.D1.AND.ABS
     *(Z(J)).LE.E2.AND.ABS(Z(J)).
     1GT.E1)  GOTO 32
      IF(ABS(Z(J)).GT.E2)
     *GOTO 33
      IF(X(I).GT.D1.AND.
     *ABS(Z(J)).LE.E2)  GOTO 34
31    P1(I,J) =QM*(2.*Z(J)
     ***2/(2.*E2)**2+0.5) + QO
      R1(I,J) =1.4E—3
      R3(I,J) =7.1E—3
      GOTO 55
32    P1(I,J) =0.
      R1(I,J) =2.
      R3(I,J) =2.
      GO TO 55
33    P1(I,J) =0.
      R1(I,J) =1.6E—3
      R3(I,J) =1.6E—3
      GOTO 55
34    P1(I,J) =0.
      R1(I,J) =5,45E—4
      R3(I,J) 1.3E—3
55    CONTINUE
      I=N1
      DO 556 J=2,N2
      R1(I,J) =2.
556   R3(I,J) =2.
      DO 333 I=2,N1
      DO 333 J=2,N2
333   R2(I,J) =R1(I,J)
      DO 6 I=3,N1
      DO 6 J=2,N2
      R=3.1415*((X(I) +H1(I)
     */2.)**2—(X(I—1) +
     *H1(I)/2.)**2)
      R1(I,J) =H1(I)/2.*
     *R1(I,J)*2.*3.1415*
     *(X(I) +H1(I)/4.)*H2(J))
      R2(I,J) =H1(I)/(2.*
     *R2(I,J)*2.*3.1415*
     *(X(I)—H1(I)/4.)*H2(J))
      R3(I,J) =H2(J)/(2.*
     *R3(I,J)*R)
      P1(I,J) =P1(I,J)*
     *H2(J)*R
 6    CONTINUE
      DO 56 J=2,N2
56    R1(2,J) =R1(3,J)
      DO 66 I=1,M1
      DO 66 J=1,M2
      P2(I,J) =P1(I,J)
      U(I,J) =TK
66    CONTINUE
      DO 7 I=3,N1
      DO 7 J=2,N2
      R4(I,J) =1./(R2(I,J) +
     *R1(I—1,J)) +1./(R1(I,J) +
     *R2(I+1,J)) +
     21./(R3(I,J) +R3(I,J—1))
     **1./(R3(I,J) +R3(I,J+1))
 7    CONTINUE
      T=0.
83    DO 84 J=8,27
      DO 84 I=3,10
      R=3.1415*((X(I) +H1(I)
     */2.)**2—(X(I) +H1(I—1)
     */2.)**2)
      PP=P1(I,J)
      TI=U(I,J)/10.
      IF(TI.LE.11.5)
     *P1(I,J) =P2(I,J) +QD*
     *(—3.414119E—4*TI**6+
     *1.335165E—2
     **TI**5—0.19936*TI**4+
     *1.449767*TI**3—5.147713*
     *TI**2+6.835535*
     *TI+5.798755—4.2)/4.2
     1*R*H2(J)
      IF(TI.GT.11.5)P1(I,J)
     *=P2(I,J) +QD*(—2.073054E—3*
     *TI**6+
     10.208451*TI**5—8.657643
     **TI**4+190.1636*TI**3—
     *2329.706*TI**2+
     21508.11*TI—
     *40316.28—4.2)/4.2
     1*R*H2(J)
      P1(I,J) =AL*P1(I,J) +
     *(1.—AL)*PP
84    CONTINUE
      TB=T
      S=1
      TI=0.
 8    DO 9 J=2,N2
      U(2,J) =U(3,J)
      DO 9 I=3,N1
      W1=U(I,J)
      U(I,J) = (P1(I,J) +
     *U(I—1,J)/(R2(I,J) +
     *R1(I—1,J) +
     1U(I+1,J)/(R2(I+1,J)
     *+R1(I,J)) +
     2U(I,J—1)/(R3(I,J) +
     *R3(I,J—1)) +U(I,J+1)
     */(R3(I,J) +R3(I,J+1)))
     */R4(I,J)
      U(I,J) =W*U(I,J) +(1.—W)*W1
 9    CONTINUE
      T=0.
      DO 68 I=1,M1
      DO 68 J=1,M2
      IF(T—U(I,J))  69,68,68
```

Таблица 4.1

Тип конденсатора	l_1	l_2	l	d_1	d_2	d	λ_{1r}	λ_{1z}	λ_{3r}	λ_{3z}	λ_{4r}	λ_{4z}
К75-31-300В-0,47 мкФ	1,34	1,41	1,66	1,14	1,54	1,54	$2{,}1\cdot10^{-1}$	$2{,}8\cdot10^{-1}$	$2{,}4\cdot10^{-1}$	$2{,}4\cdot10^{-1}$	$1{,}9\cdot10^{-1}$	$1{,}9\cdot10^{-1}$
К75-31-300В-10 мкФ	4,69	4,79	5,59	2,44	2,84	2,84	$2{,}1\cdot10^{-1}$	$2{,}8\cdot10^{-1}$	$2{,}4\cdot10^{-1}$	$2{,}4\cdot10^{-1}$	$1{,}9\cdot10^{-1}$	$1{,}9\cdot10^{-1}$
К71-4-160В-10 мкФ	3,60	3,67	4,27	1,94	2,00	2,00	$7{,}3\cdot10^{-2}$	$2{,}0\cdot10^{-1}$	$1{,}3\cdot10^{-1}$	$5{,}0\cdot10^{-2}$	$2{,}5\cdot10^{-2}$	$4{,}0\cdot10^{-2}$
К71-4-160В-6,8 мкФ	3,60	3,67	4,27	1,52	1,65	1,65	$7{,}3\cdot10^{-2}$	$2{,}0\cdot10^{-1}$	$1{,}3\cdot10^{-1}$	$5{,}0\cdot10^{-2}$	$2{,}5\cdot10^{-2}$	$4{,}0\cdot10^{-2}$
К71-4-160В-3,9 мкФ	2,60	2,67	3,17	1,40	1,48	1,48	$7{,}3\cdot10^{-2}$	$2{,}0\cdot10^{-1}$	$1{,}3\cdot10^{-1}$	$5{,}0\cdot10^{-2}$	$2{,}5\cdot10^{-2}$	$4{,}0\cdot10^{-2}$
К71-4-160В-2,2 мкФ	2,60	2,67	3,17	1,02	1,10	1,10	$7{,}3\cdot10^{-2}$	$2{,}0\cdot10^{-1}$	$1{,}3\cdot10^{-1}$	$5{,}0\cdot10^{-2}$	$2{,}5\cdot10^{-2}$	$4{,}0\cdot10^{-2}$
К71-4-160В-1,8 мкФ	2,60	2,67	3,17	0,90	1,00	1,00	$7{,}3\cdot10^{-2}$	$2{,}0\cdot10^{-1}$	$1{,}3\cdot10^{-1}$	$5{,}0\cdot10^{-2}$	$2{,}5\cdot10^{-2}$	$4{,}0\cdot10^{-2}$
К71-4-250В-1,0 мкФ	1,82	1,87	2,42	0,89	0,93	0,93	$7{,}3\cdot10^{-2}$	$2{,}0\cdot10^{-1}$	$1{,}3\cdot10^{-1}$	$5{,}0\cdot10^{-2}$	$2{,}5\cdot10^{-2}$	$4{,}0\cdot10^{-2}$
К71-4-250В-0,56 мкФ	1,80	1,85	2,40	0,68	0,73	0,73	$7{,}3\cdot10^{-2}$	$2{,}0\cdot10^{-1}$	$1{,}3\cdot10^{-1}$	$5{,}0\cdot10^{-2}$	$2{,}5\cdot10^{-2}$	$4{,}0\cdot10^{-2}$
К71-4-250В-0,33 мкФ	1,80	1,85	1,33	0,50	0,53	0,53	$7{,}3\cdot10^{-2}$	$2{,}0\cdot10^{-1}$	$1{,}3\cdot10^{-1}$	$5{,}0\cdot10^{-2}$	$2{,}5\cdot10^{-2}$	$4{,}0\cdot10^{-2}$
К71-4-250В-0,15 мкФ	1,07	1,12	1,60	0,44	0,48	0,48	$7{,}3\cdot10^{-2}$	$2{,}0\cdot10^{-1}$	$1{,}3\cdot10^{-1}$	$5{,}0\cdot10^{-2}$	$2{,}5\cdot10^{-2}$	$4{,}0\cdot10^{-2}$
К71-4-250В-0,1 мкФ	1,07	1,12	1,60	0,35	0,42	0,42	$7{,}3\cdot10^{-2}$	$2{,}0\cdot10^{-1}$	$1{,}3\cdot10^{-1}$	$5{,}0\cdot10^{-2}$	$2{,}5\cdot10^{-2}$	$4{,}0\cdot10^{-2}$
К77-5-250В-4,7 мкФ	3,90	3,95	4,15	1,80	1,90	1,90	$1{,}9\cdot10^{-1}$	$3{,}1\cdot10^{-1}$	$1{,}7\cdot10^{-1}$	$1{,}7\cdot10^{-1}$	$1{,}9\cdot10^{-1}$	$1{,}9\cdot10^{-1}$
К77-5-250В- 2,2 мкФ	3,90	3,95	4,15	1,30	1,40	1,40	$1{,}9\cdot10^{-1}$	$3{,}1\cdot10^{-1}$	$1{,}7\cdot10^{-1}$	$1{,}7\cdot10^{-1}$	$1{,}9\cdot10^{-1}$	$1{,}9\cdot10^{-1}$
К77-5-500В-3,3 мкФ	5,50	5,55	5,75	2,40	2,50	2,50	$1{,}9\cdot10^{-1}$	$3{,}1\cdot10^{-1}$	$1{,}7\cdot10^{-1}$	$1{,}7\cdot10^{-1}$	$1{,}9\cdot10^{-1}$	$1{,}9\cdot10^{-1}$
К77-5-750В-1,0 мкФ	5,50	5,55	5,75	2,15	2,25	2,25	$1{,}9\cdot10^{-1}$	$2{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}7\cdot10^{-1}$	$1{,}7\cdot10^{-1}$	$1{,}9\cdot10^{-1}$	$1{,}9\cdot10^{-1}$
К77-5-750В-0,47 мкФ	4,00	4,05	4,25	1,80	1,90	1,90	$1{,}9\cdot10^{-1}$	$2{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}7\cdot10^{-1}$	$1{,}7\cdot10^{-1}$	$1{,}9\cdot10^{-1}$	$1{,}9\cdot10^{-1}$
К77-5-750В-0,33 мкФ	4,00	4,05	4,25	1,50	1,60	1,60	$1{,}9\cdot10^{-1}$	$2{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}7\cdot10^{-1}$	$1{,}7\cdot10^{-1}$	$1{,}9\cdot10^{-1}$	$1{,}9\cdot10^{-1}$
К72-11-125В-4,7 мкФ	4,70	4,80	6,10	2,68	2,78	2,78	$3\cdot10^{-1}$	0,45	$2{,}5\cdot10^{-1}$	$2{,}5\cdot10^{-1}$	$2{,}3\cdot10^{-1}$	$2{,}3\cdot10^{-1}$
К72-11-250В-3,3 мкФ	4,70	4,80	6,10	3,18	3,28	3,28	$2{,}8\cdot10^{-1}$	0,33	$2{,}5\cdot10^{-1}$	$2{,}5\cdot10^{-1}$	$2{,}3\cdot10^{-1}$	$2{,}3\cdot10^{-1}$
К72-11-250В-2,2 мкФ	4,70	4,80	6,10	2,68	2,78	2,78	$2{,}8\cdot10^{-1}$	0,33	$2{,}5\cdot10^{-1}$	$2{,}5\cdot10^{-1}$	$2{,}3\cdot10^{-1}$	$2{,}3\cdot10^{-1}$
К72-11-250В-0,47 мкФ	2,10	2,20	3,50	1,58	1,68	1,68	$2{,}8\cdot10^{-1}$	0,33	$2{,}5\cdot10^{-1}$	$2{,}5\cdot10^{-1}$	$2{,}3\cdot10^{-1}$	$2{,}3\cdot10^{-1}$
К72-11-750В-0,33 мкФ	6,20	6,30	7,60	2,68	2,78	2,78	$2{,}6\cdot10^{-1}$	0,21	$2{,}5\cdot10^{-1}$	$2{,}5\cdot10^{-1}$	$2{,}3\cdot10^{-1}$	$2{,}3\cdot10^{-1}$
К72-11-1000В-0,1 мкФ	4,90	5,00	6,30	2,08	2,18	2,18	$2{,}5\cdot10^{-1}$	0,18	$2{,}5\cdot10^{-1}$	$2{,}5\cdot10^{-1}$	$2{,}3\cdot10^{-1}$	$2{,}3\cdot10^{-1}$
К73-26-63В-68 мкФ	2,50	2,55	3,15	1,45	1,60	1,70	$1{,}4\cdot10^{-1}$	$7{,}1\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$5{,}45\cdot10^{-2}$	$1{,}3\cdot10^{-1}$
К73-26-63В-100 мкФ	2,50	2,55	3,15	1,75	1,80	1,90	$1{,}4\cdot10^{-1}$	$7{,}1\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$5{,}45\cdot10^{-2}$	$1{,}3\cdot10^{-1}$
К73-26-63В-33 мкФ	2,50	2,55	3,15	1,00	1,12	1,20	$1{,}4\cdot10^{-1}$	$7{,}1\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$5{,}45\cdot10^{-2}$	$1{,}3\cdot10^{-1}$
К72-11А-750В-0,1 мкФ	3,35	3,35	4,20	2,30	2,50	2,98	$2{,}6\cdot10^{-1}$	0,21	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$
К72-11А-1000В-0,22 мкФ	6,15	6,35	7,00	2,90	3,10	3,52	$2{,}5\cdot10^{-1}$	0,18	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$
К72-11А-750В-0,47 мкФ	6,15	6,35	7,00	3,40	3,60	4,02	$2{,}6\cdot10^{-1}$	0,21	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$

Продолжение табл. 4.1

Тип конденсатора	l_1	l_2	l	d_1	d_2	d	λ_{1r}	λ_{1z}	λ_{3r}	λ_{3z}	λ_{4r}	λ_{4z}
К72-11А-500В-0,22 мкФ	2,90	3,10	3,75	2,20	2,40	2,82	$2{,}5\cdot10^{-1}$	0,18	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$
К72-11А-500В-1,0 мкФ	6,15	6,35	7,00	2,90	3,10	3,52	$2{,}5\cdot10^{-1}$	0,18	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$
К72-11А-125В-4,7 мкФ	4,60	4,80	5,45	2,90	3,10	3,52	$3\cdot10^{-1}$	0,45	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$
К72-11А-125В-3,3 мкФ	4,60	4,80	5,45	2,30	2,50	2,92	$3\cdot10^{-1}$	0,45	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$
К72-11А-125В-2,2 мкФ	3,35	3,55	4,20	2,30	2,50	2,92	$3\cdot10^{-1}$	0,45	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$
К72-11А-125В-1,0 мкФ	2,00	2,20	2,85	2,20	2,40	2,82	$3\cdot10^{-1}$	0,45	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$
К72-11А-250В-3,3 мкФ	4,60	4,80	5,45	3,40	3,60	4,02	$2{,}8\cdot10^{-1}$	0,33	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$
К72-11А-250В-2,2 мкФ	4,60	4,80	5,45	2,90	3,10	3,52	$2{,}8\cdot10^{-1}$	0,33	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$
К72-11А-250В-1,0 мкФ	3,60	3,80	4,45	2,30	2,50	2,92	$2{,}8\cdot10^{-1}$	0,33	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$
К72-11А-250В-0,47 мкФ	2,25	2,45	3,10	1,95	2,15	2,57	$2{,}8\cdot10^{-1}$	0,33	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$
К72-11А-500В-0,47 мкФ	4,85	5,05	5,70	2,30	2,50	2,92	$2{,}5\cdot10^{-1}$	0,18	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$
К72-11А-500В-0,33 мкФ	3,60	3,80	4,45	2,30	2,50	2,92	$2{,}5\cdot10^{-1}$	0,18	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$
К72-11А-750В-0,33 мкФ	6,15	6,35	7,00	2,90	3,10	3,52	$2{,}6\cdot10^{-1}$	0,21	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$
К72-11А-750В-0,22 мкФ	6,15	6,35	7,00	2,30	2,50	2,92	$2{,}6\cdot10^{-1}$	0,21	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$
К72-11А-1000В-0,1 мкФ	4,85	5,05	5,70	2,30	2,50	2,92	$2{,}5\cdot10^{-1}$	0,18	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$
К72-11А-1000В-0,047 мкФ	3,35	3,55	4,20	2,20	2,40	2,82	$2{,}5\cdot10^{-1}$	0,18	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$1{,}6\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-1}$
К75-10-1000В-1,0 мкФ	4,85	4,95	5,45	2,41	2,71	2,96	$1{,}7\cdot10^{-1}$	$2{,}7\cdot10^{-1}$	$1{,}75\cdot10^{-1}$	$1{,}75\cdot10^{-1}$	$1{,}75\cdot10^{-1}$	$1{,}75\cdot10^{-1}$
К75-10-750В-1,5 мкФ	4,85	4,95	5,45	2,17	2,47	2,72	$1{,}7\cdot10^{-1}$	$2{,}7\cdot10^{-1}$	$1{,}75\cdot10^{-1}$	$1{,}75\cdot10^{-1}$	$1{,}75\cdot10^{-1}$	$1{,}75\cdot10^{-1}$
К75-10-500В-3,3 мкФ	4,85	4,95	5,45	2,06	2,36	2,61	$1{,}7\cdot10^{-1}$	$2{,}7\cdot10^{-1}$	$1{,}75\cdot10^{-1}$	$1{,}75\cdot10^{-1}$	$1{,}75\cdot10^{-1}$	$1{,}75\cdot10^{-1}$
К75-10-250В-10,0 мкФ	3,90	4,00	4,50	2,06	2,36	2,61	$1{,}7\cdot10^{-1}$	$2{,}7\cdot10^{-1}$	$1{,}75\cdot10^{-1}$	$1{,}75\cdot10^{-1}$	$1{,}75\cdot10^{-1}$	$1{,}75\cdot10^{-1}$

Примечание. Линейные размеры даны в см, коэффициенты теплопроводности — в $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$; $\lambda_{2r} = \lambda_{2z} = \lambda_{5r} = \lambda_{5z} = 2\cdot10^{-2}\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$

Таблица 4.2

Тип конденсатора	q_0	q_m	P, Вт	T_m	T_c	$R_{т.вm}$	$R_{т.в.с}$
	мВт/м³			°С		К/Вт	
К75-10-1000В-1,0 мкФ	0,02	0	3,50	88,8	79,9	5,30	2,83
К75-10-750В-1,5 мкФ	0,02	0	2,83	85,5	78,4	5,48	2,97
К75-10-500В-3,3 мкФ	0,02	0	2,54	84,2	77,8	5,67	3,07
К75-10-250В-10,0 мкФ	0,02	0	2,04	83,5	77,2	6,57	3,53
К77-5-250В-4,7 мкФ	0,08	$5\cdot10^{-3}$	6,63	106,8	88,2	5,54	2,75
К77-5-250В-2,2 мкФ	0,08	$5\cdot10^{-3}$	3,45	90,6	80,9	5,95	3,16
К77-5-500В-3,3 мкФ	0,08	$4\cdot10^{-3}$	16,47	134,1	101,6	3,89	1,92
К77-5-750В-1,0 мкФ	0,08	$4\cdot10^{-3}$	13,22	123,0	97,1	4,01	2,05
К77-5-750В-0,47 мкФ	0,08	$4\cdot10^{-3}$	6,75	107,2	88,7	5,51	2,77
К77-5-750В-0,33 мкФ	0,08	$4\cdot10^{-3}$	4,68	96,7	84,0	5,71	2,99
К75-31-300В-0,47 мкФ	0,03	$3\cdot10^{-3}$	0,34	75,1	72,9	14,93	8,53
К75-31-300В-10,0 мкФ	0,03	$3\cdot10^{-3}$	5,52	96,2	84,5	4,74	2,63
К71-4-160В-10,0 мкФ	0,03	$3\cdot10^{-3}$	2,76	88,7	80,4	6,75	3,77
К71-4-160В-6,8 мкФ	0,03	$3\cdot10^{-3}$	1,66	88,9	82,1	11,38	7,29
К71-4-160В-3,3 мкФ	0,03	$3\cdot10^{-3}$	1,02	82,6	77,5	12,39	7,50
К71-4-160В-2,2 мкФ	0,03	$3\cdot10^{-3}$	0,54	78,1	75,2	15,06	9,63
К71-4-160В-1,8 мкФ	0,03	$3\cdot10^{-3}$	0,42	77,9	75,3	18,91	12,60
К71-4-250В-1,0 мкФ	0,03	$3\cdot10^{-3}$	0,28	74,8	72,9	16,89	10,40
К71-4-250В-0,15 мкФ	0,03	$3\cdot10^{-3}$	0,04	71,6	71,0	39,59	25,00
К71-4-250В-0,1 мкФ	0,03	$3\cdot10^{-3}$	0,03	71,6	71,1	64,80	36,70

```
69  I=U(I,J)
    J1=J
    I1=I
68  CONTINUE
    T3+ABS(T—T1)
    T1=T
    IF(T.GT.250)
    *GO TO 81
    IF(T3.LT.0.001) GOTO 10
    S=S+1
    IF(P—S) 10,8,8
10  WRITE(3,100) U
    WRITE(3,110) S
    S1=0.
    DO 67 I=3,N1
    DO 67 J=2,N2
67  S1=S1+P1(I,J)
    WRITE(3,103) S1
    WRITE(3,107) T3
    WRITE(3,106) T,
    *X(I1), Z(J1)
    TS=(T—TK)/S1
    WRITE(3,112) TS
    I2=0
    T4=0.
    DO 70 I=3,10
    DO 70 J=6,27
    T4=T4+U(I,J)
    I2=I2+1
70  CONTINUE
    T4=T4/I2
    WRITE(3,108) T4
    IF(ABS(TB—T).GT.0.01)
    *GOTO 83
    GO TO 82
81  WRITE(3,111) S
82  T=T
    END
```

Таблица 4.3

$U_н$, В	$C_н$, мкФ	q_0, 10^{-3} мВт/м³	P, Вт	T_m	T_c	$R_{тm}$	$R_{т.с}$	$R_{т.вm}$	$R_{т.в.с}$	$R_{т.п}$
				°С		К/Вт				
750	0,10	7,74	0,96	76,74	76,54	6,98	6,78	2,97	2,77	4,01
1000	0,22	4,88	1,69	76,75	76,29	4,00	3,72	1,87	1,59	2,13
750	0,47	4,00	1,90	76,29	75,95	3,30	3,13	1,46	1,29	1,84
500	0,22	8,16	0,82	76,47	76,29	7,89	7,68	3,38	3,17	4,51
500	1,00	4,82	1,67	76,70	76,25	4,01	3,74	1,82	1,55	2,19
125	4,70	5,33	1,41	76,11	75,96	4,34	4,23	1,79	1,68	2,55
125	3,30	6,87	1,14	76,32	76,15	5,53	5,38	2,20	2,05	3,33
125	2,20	7,74	0,96	76,30	76,18	6,25	6,21	2,35	2,31	3,90
125	1,00	10,10	0,74	76,31	76,25	8,54	8,47	3,40	3,33	5,14
250	3,30	4,44	1,61	75,88	75,72	3,64	3,54	1,53	1,43	2,11
250	2,20	5,33	1,41	76,18	76,00	4,39	4,26	1,79	1,66	2,60
250	1,00	7,50	1,00	76,43	76,28	6,45	6,30	2,65	2,50	3,80
250	0,47	10,35	0,66	76,27	76,19	9,53	9,40	3,85	3,72	5,68
500	0,47	6,03	1,05	76,22	75,88	5,92	5,59	2,59	2,26	3,33
500	0,33	5,24	0,70	74,74	74,57	6,80	6,56	2,94	2,70	3,86
750	0,33	4,88	1,69	76,71	76,31	3,97	3,73	1,78	1,54	2,19
750	0,22	5,66	1,23	76,31	75,88	5,12	4,77	2,27	1,92	2,85
1000	0,10	6,03	1,05	76,20	75,85	5,89	5,56	2,47	2,14	3,42
1000	0,047	7,98	0,91	76,77	76,55	7,44	7,19	3,15	2,91	4,29

Таблица 4.4

$U_н$, В	$C_н$, мкФ	q_0, 10^{-3}, $\frac{МВт}{м^3}$	P, Вт	T_m, °С	T_c, °С	$R_{тm}$, К/Вт	$R_{т,с}$, К/Вт	$R_{т,вт}$, К/Вт	$R_{т.в.с}$, К/Вт	$R_{т.и}$, К/Вт
125	4,70	5,33	1,41	75,31	75,15	3,77	3,66	0,97	0,86	2,80
250	3,30	4,44	1,61	75,22	75,06	3,24	3,14	0,82	0,72	2,42
250	2,20	5,33	1,41	75,49	75,30	3,89	3,76	0,96	0,83	2,93
250	0,47	10,35	0,66	75,77	75,68	8,76	8,62	2,03	1,89	6,73
750	0,33	4,88	1,69	75,92	75,52	3,51	3,27	1,05	0,81	2,46
1000	0,10	6,03	1,05	75,52	75,16	5,24	4,91	1,52	1,19	3,72

Примечание к табл. 4.3 и 4.4. $q_m = 0$; $\alpha_и = \left[0{,}212 \cdot 10^{-6}\left(\frac{T_к + T_0}{2} + 273\right)^2 + 1{,}3\left(\frac{T_к - T_0}{2l \cdot 10^{-4}}\right)^{1/4}\right] \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$;

удельная мощность тепловыделения в контактном узле $q_s = 2q_0$.

Таблица 4.5

Тип конденсатора	$T_к$, °С	q_0, $\frac{МВт}{м^3}$	P, Вт	T_m, °С	T_c, °С	$R_{т.вт}$, К/Вт	$R_{т.в.с}$, К/Вт
К73-26-63В-68 мкФ	47	0,10	3,32	78,4	63,3	9,41	4,91
К73-26-62В-68 мкФ	47	0,12	8,63	158,0	108,6	12,85	7,14
К73-26-63В-68 мкФ	47	0,15	12,98	172,1	122,5	9,63	5,82
К73-26-63В-68 мкФ	29	0,08	0,39	32,4	30,8	8,81	4,62
К73-26-63В-100 мкФ	56	0,09	4,32	88,7	73,0	7,54	3,94
К73-26-63В-33 мкФ	90	0,02	1,74	119,4	105,2	16,87	8,74
К73-26-63В-33 мкФ	31	0,02	0,83	40,8	36,4	12,93	651

Примечание. Удельная начальная мощность тепловыделения в критическом тепловом режиме $q_{кр}$ для конденсатора К73-26-63В-68 мкФ при $T_к = 47$ °С и $q_m = 0$ составляет 0,2 $\frac{МВт}{м^3}$.

Примеры расчетов тепловых сопротивлений конденсаторов

В табл. 4.1 приведены линейные размеры и коэффициенты теплопроводности некоторых типов и номиналов цилиндрических конденсаторов. Условные обозначения соответствуют расчетной схеме, изображенной на рис. 5.4.1.

Теплофизические параметры цилиндрических конденсаторов с тепловыделением, не зависящим от температуры, при постоянной температуре корпуса ($T_к = \text{const} = 70$°С) представлены в табл. 4.2. Формула для вычисления суммарного удельного тепловыделения имеет вид

$$q = q_0 + q_m\left[\frac{(2Z - H)^2}{2H^2} + 0{,}5\right],$$

где H — высота активной части секций.

В табл. 4.3 и 4.4 даны теплофизические параметры соответственно конденсаторов К72-11А и К72-11 (металлический корпус) с коэффициентом теплоотдачи, зависящим от температуры, при постоянной температуре охлаждающего воздуха ($T_0 = \text{const} = 70$°С).

Теплофизические параметры цилиндрических конденсаторов с тепловыделением, зависящим от температуры, при различных температурах корпуса приведены в

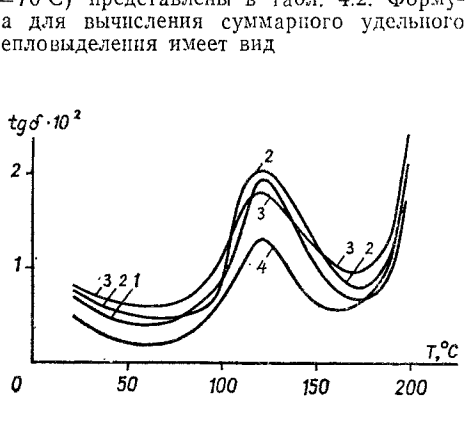


Рис. 4.1. Экспериментальные температурные зависимости tg δ для различных конденсаторов: *1* — К73-26-63В-68 мкФ; *2* — К73-26-63В-100 мкФ; *3* — К73-26-63В-33 мкФ; *4* — К73П-2-400В-4,0 мкФ

Таблица 4.6

q_0, $\frac{МВт}{м^3}$	P, Вт	T_m, °С	T_c, °С	$R_{тm}$, К/Вт	$R_{т.с}$, К/Вт
0,045	1,51	58,19	52,48	19,22	15,55
0,08	2,67	79,65	68,77	18,95	14,89
0,09	3,13	89,72	75,61	19,38	14,88
0,10	9,76	174,47	150,74	14,90	12,47
0,11	10,00	179,20	152,93	15,00	12,49

Примечание. $q_m = 0$; $\alpha_и = 19{,}5$ $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$;

$q_{кр} = 0{,}12$ $\frac{МВт}{м^3}$.

Тип конденсатора	q_0, МВт/м³	q_m, МВт/м³	P, Вт	Θ_m, К	Θ_c, К	$R_{т.вт}$, К/Вт	$R_{т.в.с}$, К/Вт
МБГЧ-250В-1,0 мкФ	0,05	0,004	7,25	29,70	16,70	4,10	2,30
МБГЧ-250В-1,0 мкФ	0,04	0,004	4,94	18,70	10,50	3,77	2,12
МБГЧ-250В-1,0 мкФ	0,03	0,004	3,56	13,00	7,29	3,64	2,05
МБГЧ-250В-1,0 мкФ	0,017	0,017	3,70	12,60	7,14	3,41	1,93
МБГЧ-250В-1,0 мкФ	0,0068	0,0272	3,83	12,50	7,20	3,25	1,87
МБГЧ-250В-1,0 мкФ	0,0017	0,0323	3,84	12,20	6,90	3,1	1,80
МБГЧ-500В-1,0 мкФ	0,045	0,004	1,78	12,10	7,38	6,78	4,15
МБГЧ-500В-1,0 мкФ	0,03	0,004	1,16	7,80	4,79	6,68	4,12
МБГЧ-500В-2,0 мкФ	0,03	0,004	2,90	12,00	7,10	4,14	2,44
МБГЧ-500В-4,0 мкФ	0,045	0,004	10,20	33,60	18,50	3,3	1,82
МБГЧ-500В-4,0 мкФ	0,03	0,004	7,91	24,06	13,84	3,04	1,75
МБГЧ-750В-0,5 мкФ	0,08	0,004	5,42	29,13	14,48	5,37	2,67
МБГЧ-750В-0,5 мкФ	0,07	0,004	4,27	21,75	11,21	5,08	2,63
МБГЧ-750В-0,5 мкФ	0,05	0,004	2,81	13,51	7,24	4,79	2,58
МБГЧ-750В-0,5 мкФ	0,03	0,004	1,70	7,87	4,31	4,63	2,53
МБГЧ-750В-1,0 мкФ	0,03	0,004	3,04	11,42	6,83	3,76	2,25
МБГЧ-750В-2,0 мкФ	0,035	0,004	8,26	29,10	15,60	3,51	1,89
МБГЧ-750В-2,0 мкФ	0,03	0,004	6,44	21,30	11,20	3,31	1,74
МБГЧ-750В-0,25 мкФ	0,03	0,004	0,84	5,68	3,40	6,75	4,05
МБГЧ-1000В-1,0 мкФ	0,03	0,004	7,34	28,60	14,00	3,89	1,91

Примечание. $\Theta_m = T_m - T_к$; $\Theta_c = T_c - T_к$; $q_m = 0$; удельная начальная мощность тепловыделения в критическом режиме $q_{кр}$ для МБГЧ-250В-10 мкФ $\left(\text{в } \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3}\right)$ составляет 0,005; МБГЧ-500В-4,0 мкФ — 0,05; МБГЧ-750В-0,5 мкФ — 0,085; МБГЧ-750В-2,0 мкФ — 0,04; зависимость суммарного удельного тепловыделения от температуры имеет вид $q = q_0 [1 + 1{,}2 \cdot 10^{-3} (70 - T)^2] + q_m$ при $T > 70$ °С; $q = q_0 + q_m$ при $T \leqslant 70$ °С.

табл. 4.5. Суммарное удельное тепловыделение вычисляется по формуле

$$q = q_0 \operatorname{tg}\delta(T) / \operatorname{tg}\delta_{min}.$$

Температурные зависимости tgδ, используемые при расчетах, изображены на рис. 4.1.

Теплофизические параметры конденсатора К73-26-63В-68 мкФ с тепловыделением и коэффициентом теплоотдачи, зависящими от температуры, при постоянной температуре охлаждающего воздуха ($T_0 = 29$°С) приведены в табл. 4.6 ($\alpha = \alpha_н \left(\frac{T_к - T_0}{20}\right)^{1/4}$, где $\alpha_н$ — начальное значение α при $T = 20$°С).

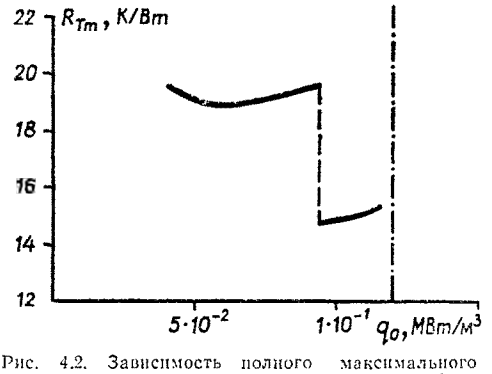


Рис. 4.2. Зависимость полного максимального теплового сопротивления конденсатора К73-26-63В-68 мкФ от начальной удельной мощности тепловыделения в диэлектрике

В табл. 4.7 даны теплофизические параметры конденсаторов типа МБГЧ с тепловыделением, зависящим от температуры, при постоянной температуре корпуса ($T_к = \text{const} = 70$°С).

Теплофизические параметры конденсаторов призматической формы с тепловыделением, не зависящим от температуры, при постоянной температуре корпуса ($T_к = \text{const} = 70$°С) приведены в табл. 4.8.

В табл. 4.9 даны теплофизические параметры конденсатора К73П-2-400В-

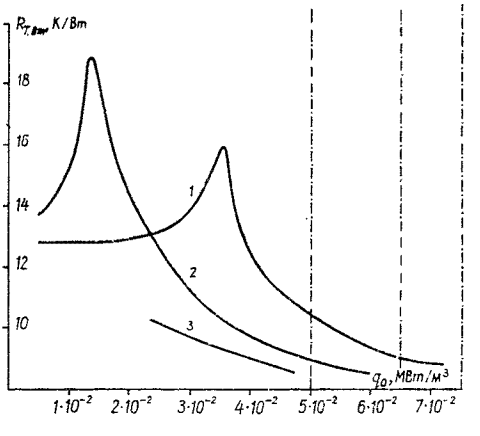


Рис. 4.3. Зависимость внутреннего максимального теплового сопротивления конденсатора К73П-2-400В-4,0 мкФ от начальной мощности тепловыделения в диэлектрике при различных температурах корпуса. $T_к$, °С: *1* — 70; *2* — 85; *3* — 100

Таблица 4.8

Тип конденсатора	P, Вт	T_m	T_c	$R_{т.в\,m}$	$R_{т.в.с}$
		°С		К/Вт	
ПСК-4,5 кВ-4,0 мкФ	125,65	90,03	87,4	0,16	0,14
ПСК-450В-30,0 мкФ	14,4	82,25	84,4	1,00	0,85
ЛСМ-400В-7,8 мкФ	1,96	73,25	72,43	1,66	1,24
ЛС-400В-3,8 мкФ	1,47	72,72	71,87	1,85	1,28

Примечание. q_m 0; $q_0 = 0{,}013\ \frac{МВт}{м^3}$.

4,0 мкФ с тепловыделением, зависящим от температуры, при различных температурах корпуса.

Функциональная зависимость полного максимального теплового сопротивления конденсатора К73-26-63В-68 мкФ от начальной удельной мощности тепловыделения в диэлектрике изображена на рис. 4.2. Штрихпунктирная линия соответствует начальной удельной мощности тепловыде-

Таблица 4.9

$T_к$, °С	q_0, $\frac{МВт}{м^3}$	P, Вт	T_m	T_c	$R_{т.в\,m}$	$R_{т.в.с}$
			°С		К/Вт	
85	0,005	0,24	88,36	86,59	13,7	6,63
85	0,010	0,61	94,23	89,01	15,1	6,57
85	0,0125	1,036	103,15	92,40	17,5	7,14
85	0,013	1,237	107,69	94,01	18,35	7,28
85	0,0135	1,52	113,84	96,30	18,9	7,43
85	0,0145	2,09	123,21	100,51	18,3	7,42
85	0,014	1,83	119,43	98,66	18,7	7,46
85	0,015	2,30	125,85	101,94	17,7	7,37
85	0,0175	3,12	133,80	107,18	15,6	7,11
85	0,020	3,75	138,40	110,82	14,25	6,89
85	0,025	4,74	144,88	116,24	12,6	6,59
85	0,080	5,83	150,56	121,48	11,2	6,26
85	0,035	6,77	154,77	125,72	10,3	6,01
85	0,045	7,48	157,97	129,04	9,7	5,89
85	0,045	8,15	160,46	131,87	9,25	5,75
85	0,05	8,7	162,54	134,2	8,9	5,66
85	0,055	9,18	164,45	136,21	8,6	5,58
85	0,06	9,6	166,41	137,96	8,45	5,52
70	0,025	0,78	80,33	75,01	13,22	6,42
70	0,03	0,96	83,31	76,27	13,81	6,53
70	0,035	1,23	89,45	78,35	15,77	6,79
70	0,0375	5,93	150,33	140,73	13,52	6,87
70	0,04	6,69	152,87	114,20	12,38	6,61
70	0,045	7,76	156,88	119,13	11,9	6,33
70	0,05	8,63	159,69	123,00	10,38	6,14
70	0,055	9,39	161,95	126,17	9,78	5,98
70	0,06	10,07	163,97	128,90	9,32	5,50
70	0,065	10,66	165,89	131,22	8,99	5,74
70	0,07	11,8	168,20	133,32	8,77	5,66
100	0,03	5,74	155,47	133,12	9,65	5,77
100	0,035	6,28	158,53	135,77	9,31	5,70
100	0,04	6,75	160,95	137,95	9,02	5,62
100	0,045	7,53	164,99	141,53	8,61	5,52
120	0,015	2,74	148,96	136,20	10,56	5,91
120	0,02	3,31	154,14	139,39	10,31	5,86
120	0,025	3,78	157,77	141,95	9,98	8,81
120	0,03	4,18	160,52	144,03	9,69	5,75

Примечание. Удельная начальная мощность тепловыделения в критическом тепловом режиме $q_{кр}$ при q_m 0, $T_к$ 85 °С составляет $0{,}065\frac{МВт}{м^3}$; $T_к$ 70 °С — $q_{кр}$ $0{,}075\frac{МВт}{м^3}$; $T_к$ 100 °С — $q_{кр}$ $0{,}05\frac{МВт}{м^3}$; $T_к$ 120 °С — $q_{кр}$ $0{,}035\ \frac{МВт}{м^3}$.

ления в критическом тепловом режиме. При $q_0=0{,}095\ \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3}$ функция $R_{тm}(q_0)$ испытывает разрыв непрерывности первого рода.

На рис. 4.3 показаны графики зависимости внутреннего максимального теплового сопротивления конденсатора К73П-2-400В-4,0 мкФ от начальной удельной мощности тепловыделения в диэлектрике при различных температурах корпуса. Кривым *1—3* соответствует критическое значение $q_{кр}$, при котором не существует устойчивого теплового режима. Соответствующую каждой зависимости асимтому следует понимать как предел установившегося теплового режима.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Расчет нестационарных тепловых полей конденсаторов

Нестационарное распределение температуры в анизотропной неоднородной среде описывается уравнением теплопроводности, которое в инвариантной форме имеет вид

$$c_T \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda, \operatorname{grad} T) + q. \qquad (5.1)$$

В декартовых (x, y, z) и цилиндрических координатах (r, φ,z) выражение (5.1) эквивалентно уравнениям

$$c_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) + q; \qquad (5.2)$$

$$c_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda_r \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\lambda_\varphi \frac{\partial T}{\partial \varphi}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) + q. \qquad (5.3)$$

Коэффициент c_T, который может зависеть от координат, температуры и времени, означает объёмную теплоемкость материала. Все остальные условные обозначения, а также граничные условия для уравнений (5.2) и (5.3) совпадают с принятыми в § 5.4.

Кроме граничных условий для стационарных уравнений (5.2) и (5.3) необходимо определить начальные условия, которые сводятся к заданию температуры по объёму конденсатора на начальный момент времени $t=t_0$.

В § 5.4 подробно описано построение разностной схемы для стационарного уравнения $\operatorname{div}(\lambda, \operatorname{grad} T)+q=0$. Запишем разностный аналог этого уравнения в операторной форме $L_h T_h=0$.

Разобъём заданный временной интервал $t_0 \leqslant t \leqslant t_{max}$ на промежутки с шагом τ. Для нестационарного режима расчет ведется последовательно в порядке возрастания номеров временных слоев. Отдельный цикл расчета заключается в том, что по известным температурам в фиксированных узлах пространственной сетки на данный момент времени $t=t_0$ определяются значения температур в тех же узлах на момент $t=t_0+\tau$.

Для уравнения (5.1) построим параметрическую разностную схему

$$\frac{c_{Tijk} V_{ijk}}{\tau}(\hat{T}_{ijk} - T_{ijk}) = \sigma L_h \hat{T}_h + (1-\sigma) L_h T_h, \quad 0 \leqslant \sigma \leqslant 1.$$

Здесь c_{Tijk} — значение коэффициента теплоемкости в ячейке с номером (i, j, k); V_{ijk} — объём ячейки; $\hat{T}$ — неизвестные температуры, соответствующие временному слою $t_0+\tau$.

Схема содержит параметр σ, который является весовым множителем при пространственном разностном операторе на верхнем слое. При $\sigma=1/2$ получаем симметричную схему, имеющую второй порядок аппроксимации по времени. При $\sigma \neq 1/2$ аппроксимация имеет первый порядок.

Явная схема ($\sigma=0$) для параболического уравнения редко употребляется из-за жестких ограничений на величину временного шага ($\tau \sim h^2$), который выбирается исходя из условий устойчивости численного алгоритма. Наиболее употребительны неявные схемы, которые при $\sigma \geqslant 1/2$ являются, безусловно, устойчивыми по начальным данным и правой части (т. е. никаких ограничений на шаг τ не накладывается).

При использовании неявной схемы для определения поля температур необходимо на каждом слое решать систему алгебраических уравнений. Для их решения, как и в установившемся режиме, используется метод последовательной верхней релаксации. Системы разностных соотношений, аппроксимирующих уравнения (5.2) и (5.3), имеют вид

$$\left(\frac{c_{Tijk}\, h_{xi} h_{yj} h_{zk}}{\tau} + \sigma\gamma_{ijk}\right)\hat{T}_{ijk} = P_{ijk} - (1-\sigma)\gamma_{ijk} T_{ijk} + T_{ijk}\frac{c_{Tijk}\, h_{xi} h_{yj} h_{zk}}{\tau} + (1-\sigma)\left(\beta^-_{xijk} T_{i-1,\,jk} + \beta^+_{xijk} T_{i+1,\,jk} + \beta^-_{yijk} T_{i,\,j-1,k} + \beta^+_{yijk} T_{i,\,j+1,k} +\right.$$

$$+\beta^{-}_{zijk}T_{ij,\,k-1}+\beta^{+}_{zijk}T_{ij,\,k+1}\Big)+$$

$$+\sigma\Big(\beta^{-}_{xijk}\hat{T}_{i-1,\,jk}+\beta^{+}_{xijk}\hat{T}_{i+1,\,jk}+$$

$$+\beta^{-}_{yijk}\hat{T}_{i,\,j-1,\,k}+\beta^{+}_{zijk}\hat{T}_{i,\,j+1,\,k}+$$

$$+\beta^{-}_{zijk}\hat{T}_{ij,\,k-1}+\beta^{+}_{zijk}\hat{T}_{ij,\,k+1}\Big);$$

$$\left(\frac{c_{Tik}R_i h_{zk}}{\tau}+\sigma\gamma_{ik}\right)\hat{T}_{ik}=$$

$$=P_{ik}-(1-\sigma)\gamma_{ik}T_{ik}+$$

$$+\frac{c_{Tik}R_i h_{zk}}{\tau}T_{ik}+(1-\sigma)\Big(\beta^{-}_{rik}T_{i-1,\,k}+$$

$$+\beta^{+}_{rik}T_{i+1,\,k}+\beta^{-}_{zik}T_{i,\,k-1}+\beta^{+}_{zik}T_{i,\,k+1}\Big)+$$

$$+\sigma\Big(\beta^{-}_{rik}\hat{T}_{i-1,\,k}+\beta^{+}_{rik}\hat{T}_{i+1,\,k}+$$

$$+\beta^{-}_{zik}\hat{T}_{i,\,k-1}+\beta^{+}_{zik}\hat{T}_{i,\,k+1}\Big).$$

Последнее уравнение выписано с учетом осевой симметрии. Аппроксимация граничных условий такая же, как и для стационарных уравнений.

В качестве примера на рис. 5.1 показана зависимость максимальной температуры конденсатора К73П-2-400В-4,0 мкФ от времени при следующих значениях исходных данных: $c_T=1{,}6\dfrac{\text{МВт}\cdot\text{с}}{\text{К}\cdot\text{м}^3}$; $T_к=\text{const}=70°\text{C}$; $T|_{t=0}=T_к$; $\sigma=1$. Плотность источников тепла в диэлектрике принималась независящей от температуры и времени ($q=$ =const).

Известно, что температурное поле в нестационарном режиме с течением времени асимтотически стремится к установившемуся (стационарному) распределению. Установившееся значение максимальной температуры при $q=10^{-2}$ МВт/м^3 равно 73,46°С, а при $q=3\cdot10^{-2}$ МВт/м^3 — 80,38°С.

При расчете динамики температурного поля использовались пространственная сетка (16×12×12) и временной шаг $\tau=10$ с. Сопоставление этих расчетных данных с численными результатами, полученными при более мелком шаге ($\tau=1$ с), показало их удовлетворительное совпадение.

Основные обозначения и распечатка программы на языке ФОРТРАН для расчета нестационарных тепловых полей конденсаторов цилиндрической формы

M1 — число узлов разностной схемы по оси r

M2 — число узлов разностной схемы по оси z

N1 — число ячеек по оси r

N2 — число ячеек по оси z

E1 — l_1, E2 — l_2, E3 — l, D1 — d_1, D2 — d_2 (см. рис. 5.4.1)

X — массив размером M1, состоящий из координат узлов по оси r

Z — массив размером M2, состоящий из координат узлов по оси z

H1 — массив размером N1, содержащий линейные размеры ячеек по оси r

H2 — массив размером N2, содержащий линейные размеры ячеек по оси z

QM — удельная мощность тепловыделения в обкладках (q_m)

QD — начальная удельная мощность тепловыделения в диэлектрике (q_0)

TK — температура корпуса ($T_к$)

T — максимальная температура (T_m)

T4 — средняя температура (T_c)

TS — внутреннее или полное тепловое сопротивление ($R_{т.вт}$, $R_{тm}$)

S1 — полная мощность тепловыделения в конденсаторе (P)

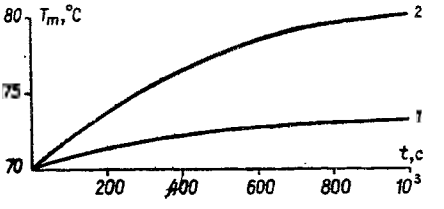


Рис. 5.1. Зависимость максимальной внутренней температуры конденсатора К73П-2-400В-4,0 мкФ от времени. q_0, МВ/м^3: 1 — $1\cdot10^{-2}$; 2 — $3\cdot10^{-2}$

S — число итераций

TЗ — абсолютная погрешность метода верхней релаксации

W — итерационный параметр

AL — стабилизирующий множитель

CC — коэффициент теплоемкости (c_T)

DT — шаг по времени (τ)

KK — число временных шагов

U — массив размером M1×M2, предназначенный для хранения и вычисления значений температур в узлах

P1 — массив размером M1×M2, состоящий из значений мощности тепловыделения в элементарных ячейках

R1, R2, R3, R4 — массивы размером M1×M2, состоящие соответственно из значений величин R^{+}_{rik}, R^{-}_{rik}, R_{zik}, γ_{jk}.

При использовании чисто неявной схемы ($\sigma=1$) объём оперативной памяти для сетки (14×34) составляет не более 26 килобайт. Выдача информации на печать такая же, как и для стационарного режима.

```
      DIMENSION H1(13),
     *H2(33),X(14),
     *Z(34),U(14,34),
     1P1(14,34),R1(14,34),
     *R2(14,34),R3(14,34),
     *R4(14,34)
     2,P2(14,34)
     3,AA(14,34)
      INTEGER S,P
100   FORMAT(14F8.2)
101   FORMAT(13E9.2)
103   FORMAT(5X,'ПОЛНАЯ
     *МОЩНОСТЬ=',F10.5)
104   FORMAT(5X,'X=',10F10.6)
105   FORMAT(5X,'Z=',10F10.6)
106   FORMAT(5X, 'МАКСИМАЛЬ-
     *НАЯ ТЕМПЕРАТУРА=',F7.2,5X,
     *'X=',F10.6,5X,
     *'Z=',F10.6)
```

```
107  FORMAT(5X, 'АБСОЛЮТНАЯ
    *ПОГРЕШНОСТЬ='E13.6)
108  FORMAT(5X, 'СРЕДНЯЯ
    *ТЕМПЕРАТУРА='F8.2)
110  FORMAT(5X, 'ЧИСЛО
    *ИТЕРАЦИЙ='15)
111  FORMAT(5X, 'ТЕПЛОВАЯ
    *НЕСТАБИЛЬНОСТЬ', 5X, 'S='14)
112  FORMAT(30X, 'ВНУТРЕННЕЕ
    *ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ='
    *F10.5)
113  FORMAT(40X, 'ТЕМПЕРА
    *ТУРА КОРПУСА'F8.2)
120  FORMAT(5X, F12.8)
     P=400
     W=1.8
     N1=13
     N2=33
     M1=N1+1
     M2=N2+1
     QM=0.
     QD=0.095
     TK=70.
     AL=0.5
     E1=2.5
     E2=2.55
     E3=3.15
     D1=1.45
     D2=1.6
     D3=1.7
     AO=19. 5E—4
     DT=1.
     CC=1.6
     KI=0
     KK=150
     DO 21 I=1,11
21   H1(I)=D1/9,
     H1(N1—1)=D2—D1
     H1(N1)=D3—D2
     H2(2)=E3—E2
     H2(3)=E2—E1
     H2(N2—1)=E2—E1
     H2(N2)=E3—E2
     DO25 I=4,31
25   H2(I)=E1/14.
     Z(1)=—E3
     Z(2)=Z(1)+H2(2)/2.
     DO 2 J=3,N2
 2   Z(J)=Z(J—1)+(H2(J—1)+
    *H2(J))/2.
     Z(M2)=Z(N2)+H2(N2)/2.
     X(1)=—H1(2)
     X(2)=—H1(2)/2.
     DO 3 I=3,N1
 3   X(I)=X(I—1)+(H1(I—1)+
    *H1(I))/2.
     X(M1)=X(N1)+H1(N1)/2.
     WRITE(3,104) X
     WRITE(3,105) Z
     DO 4 I=1,N1
     DO 4 J=1,M2
     P1(I,J)=0.
     R1(I,J)=0.
     R2(I,J)=0.
     R3(I,J)=0.
 4   CONTINUE
     DO 55 I=2,N1
     DO 55 J=2,N2
     IF(X(I).LE.D1.AND.ABS
    *(Z(J)).LE.E1) GOTO 31
     IF(X(I).LE.D1.AND.ABS
    *(Z(J)).LE.E2.AND.ABS(Z.J)).
    1GT.E1) GOTO 32
     IF(ABS(Z(J)).GT.E2)
    *GOTO 33
     IF(X(I).GT.D1.AND.
    *ABS(Z(J)).LE.E2) GOTO 34
31   P1(I,J)=QM*(2.*Z(J)
    ***2/(2.*E2)**2+0.5)+QD
     R1(I,J)=1.4E—3
     R3(I,J)=7.1E—3
     GOTO 55
32   P1(I,J)=0.
     R1(I,J)=0.
     R3(I,J)=2.
     GO TO 55
33   P1(I,J)=0.
     R1(I,J)=1.6E—3
     R3(I,J)=1.6E—3
     GOTO 55
34   P1(I,J)=0.
     R1(I,J)=5.45E—4
     R3(I,J)=1.3E—3
55   CONTINUE
     I=N1
     DO 556 J=2,N2
     R1(I,J)=2.
556  R3(I,J)=2.
     DO 333 I=2,N1
     DO 333 J=2,N2
333  R2(I,J)=R1(I,J)
     DO 6 I=3,N1
     DO 6 J=2,N2
     R=3.1415*((X(I)+
    *H1(I)/2.)**2—(X(I—1)+
    *H1(I)/2.)**2)
     R1(I,J)=H1(I)/(2.
    **R1(I,J)+2.*3.1415*
    *(X(I)+H1(I)/4.)*H2(J))
     R2(I,J)=H(I)/(2.
    **R2(I,J)*2.*3.1415*
    *(X(I)—H1(I)/4.)*H2(J))
     R3(I,J)=H2(J)/
    *(2.*R3(I,J)*R)
     P1(I,J)+P1(I,J)*
    *H2(J)*R
 6   CONTINUE
     DO 56 J=2,N2
56   R1(2,J)=R1(3,J)
     DO 66 I=1,M1
     DO 66 J=1,M2
     P2(I,J)+P1(I,J)
     U(I,J)=TK
66   CONTINUE
     DO 883 I=1,M1
     DO 883 J=1,M2
     AA(I,J)=AO
883  CONTINUE
     T=0.
83   DO 84 J=2,N2
     DO 84 I=2,N1
     R3.1415*((X(I)+
    *H1(I)/2.)**2—(X(I—1)+
    *H1(I—1)/2.)**2)
     P1(I,J)=P2(I,J)+
    *U(I,J)*CC/DT
    1*R*H2(J)
84   CONTINUE
88   TB=T
     DO 60 J=2,N2
     TT=(U(N1,J)*R2(M1,J)+
    *TK*R1(N1,J))/(R2(M1,J)
    **R1(N1,J))
     IF(U(N1,J).GT.TK)
```

```
     *AA(M1,J)=AO*SQRT(
     *(TT—TK)/20.))
     1*AL+(1.—AL)*AA(M1,J)
60   R2(M1,J)=1./(AA(M1,J)
     **3.1415*D3*H2(J))/2.
     DO 58 I=3,N1
     TT=(U(I,2)*R3(I,1)+TK
     **R3(I,2))/(R3(I,1)+R3(I,2))
     WRITE(3,113) TT
58   IF(U(I,2), GT,TK)
     *AA(I,1)=AO*SQRT(SQRT)
     *(TT—TK)/20.))
     1*AL*(1.—AL)*AA(I,1)
     DO 59 I=3,N1
     TT=(U(I,N2)*R3(I,M2)+
     *TK*R3(I,N2))/(R3(I,M2)+
     *R3(I,N2))
     1*AL*(1.—AL)*AA(I,M2)
     DO 61 J=1, M2, N2
     DO 61 I=3,N1
     R=3.1415*((X(I)+H1(I)
     */2.)**2—(X(I—1)+H1(I—1)
     */2.)**2)
61   R3(I,J)=1./(AA(I,J)*R)
     DO 7 I=3,N1
     DO 7 J=2,N2
     R4(I,J)=1./(R2(I,J)+
     *R1(I—1,J))+1./(R1(I,J)+
     *R2(I+1,J))+
     21./(R3(I,J)+R3(I,J—1))+
     *1./(R3(I,J)+R3(I,J+1))
 7   CONTINUE
     S=1
     T1=0.
 8   DO 9 J=2,N2
     U(2,J)=U(3,J)
     DO 9 I=3,N1
     R=3.1415*((X(I)+H1(I)
     */2.)**2—(X(I—1)+
     *H1(I—1)/2.)**2)
     W1=U(I,J)
     U(I,J)=(P1(I,J)+
     *U(I—1,J)/(R2(I,J)+
     *R1(I—1,J))+
     1U(I+1,J)/(R2(I+1,J)+
     *R1(I,J))+
     2U(I,J—1)/(R3(I,J)+
     *R3(I,J—1))+U(I,J+1)/(R3
     *(I,J)+R3(I,J+1)))/R4(I,J)
     3*R4(I,J)/(R4(I,J)+
     *(1.—W)*W1
 9   CONTINUE
     T=0.
     DO 68 I=1,M1
     DO 68 J=1,M2
     IF(T—U(I,J))
     *69,68,68
69   T=U(I,J)
     J1=J
     I1=I
68   CONTINUE
     T3=ABS(T—T1)
     T1=T
     IF(T.GT.250)
     *GO TO 81
     IF(T3.LT.0.0001)
     *GO TO 10
     IF(T3.LT.0.0001)
     GO TO 10
     S=S+1
     IF(P—S) 10,8,8
10   WRITE(3,100) U
     WRITE(3,110) S
     S1=0.
     DO 67 I=3,N1
     DO 67 J=2,N2
67   S1=S1+P2(I,J)
     WRITE(3,103) S1
     WRITE(3,107) T3
     WRITE(3,106) T,
     *X(I1), Z(J1)
     TS=(T—TK)/S1
     WRITE(3,112) TS
     T4=0.
     RR=0.
     DO 70 I=3,11
     DO 70 J=4,31
     R=3.1415*((X(I)+H1(I)
     */2.)**2—(X(I—1)+
     *H1(I—1)/2.)**2)
     RR=RR+H2(J)*R
     T4=T4*U(I,J)*H2(J)*R
70   CONTINUE
     T4=T4/RR
     WRITE(3,108) T4
     TS=(T4—TK)/S1
     WRITE(3,112) TS
     KI=KI+1
     IF(ABS(TB—T).GT.0.1)
     * GOTO 83
     GO TO 82
81   WRITE(3,111) S
82   T=T
     END
```

Основные обозначения и распечатка программы на языке ФОРТРАН для расчета нестационарных тепловых полей конденсаторов призматической формы

M1 — число узлов разностной схемы по оси x

M2 — число узлов разностной схемы по оси y

M3 — число узлов разностной схемы по оси z

N1 — число ячеек по оси x

N2 — число ячеек по оси y

N3 — число ячеек по оси z

X — массив размером M1, состоящий из координат узлов по оси x

Y — массив размером M2, состоящий из координат узлов по оси y

Z — массив размером M3, состоящий из координат узлов по оси z

H1 — массив размером N1, содержащий линейные размеры ячеек по оси x

H2 — массив размером N2, содержащий линейные размеры ячеек по оси y

H3 — массив размером N3, содержащий линейные размеры ячеек по оси z

QM — удельная мощность тепловыделения в обкладках (q_m)

QD — начальная удельная мощность тепловыделения в диэлектрике (q_0)

TK — температура корпуса ($T_к$)

T — максимальная температура (T_m)

T4 — средняя температура (T_c)

TS — внутреннее или полное тепловое сопротивление ($R_{т.вт}$, $R_{тт}$)

S1 — полная мощность тепловыделения в конденсаторе (P)

S — число итераций

T3 — абсолютная погрешность метода верхней релаксации

W — итерационный параметр
AL — стабилизирующий множитель
CC — коэффициент теплоемкости (c_τ)
DT — шаг по времени (τ)
KK — число временных шагов
U — массив размером M1×M2×M3, предназначенный для хранения и вычисления значений температур в узлах
P1 — массив размером M1×M2×M3, состоящий из значений мощности тепловыделения в элементарных ячейках
R1, R2, R3, R4 — массивы размером M1×M2×M3, состоящие соответственно из значений величин R_{xijk}, R_{yijk}, R_{zijk}, γ_{ijk}.

При использовании чисто неявной схемы ($\sigma=1$) объём оперативной памяти для сетки (16×12×12) составляет не более 66 килобайт. Выдача информации на печать такая же, как и для стационарного режима.

```
      DIMENSION H1(15),
     *H2(11),H3(11),
     1P1(16,12,12),
     *R1(16,12,12),R2(16,12,12),
     R3(16,12,12),R4(16,12,12)
     2,U(16,12,12)
     3,X(16),Y(12),Z(12)
     4,P2(16,12,12)
      INTEGER S, P
  100 FORMAT(16F6.2)
  101 FORMAT(2X, 'X='16F6.3)
  102 FORMAT(2X, 'Y='12F6.3)
  103 FORMAT(5X, 'ПОЛНАЯ
     *МОЩНОСТЬ='F10.5)
  105 FORMAT(2X,
     *'Z='12F6.3)
  106 FORMAT(5X, 'МАКСИМАЛЬ
     *НАЯ ТЕМПЕРАТУРА='F7.2,5X,
     *'X='F6.3, 5X,
     *'Y'=F6.3, 5X,'Z='F6.3)
  107 FORMAT(5X, 'АБСОЛЮТНАЯ
     *ТЕМПЕРАТУРА='E13.6)
  108 FORMAT(5X, 'СРЕДНЯЯ
     *ТЕМПЕРАТУРА='F8.2)
  110 FORMAT(5X, 'ЧИСЛО
     *ИТЕРАЦИЙ='15)
  111 FORMAT(5X, 'ТЕПЛОВАЯ
     *НЕСТАБИЛЬНОСТЬ', 5X, 'S='14)
  112 FORMAT(30X, 'ВНУТРЕННЕЕ
     *ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ='
     *,F10.5)
  113 FORMAT(11F6.4)
      W=1.55
      P=100
      N1=15
      N2=11
      N3=11
      M1=N1+1
      M2=N2+1
      M3=N3+1
      READ(1,113) H3,H2,H1
      Z(1)=0.
      X(1)=0.
      Y(1)=0.
      X(2)=H1(2)/2.+X(1)
      Y(2)+H2(2)/2.+Y(1)
      Z(2)=H3(2)/2.+Z(1)
      DO 34 I=3,N1
   34 X(I)=X(I—1)+(H1(I)+
     *H1(I—1))/2.
      X(M1)=X(N1)+H1(N1)/2.
      DO 35 I=3,N2
   35 Y(I)=Y(I—1)+(H2(I)+
     *H2(I—1))/2.
      Y(M2)=Y(N2)+H2(N2)/2.
      DO 36 I=3,N3
   36 Z(I)=Z(I—1)+(H3(I)+
     *H3(I—1))/2.
      Z(M3)+Z(N3)+H3(N3)/2.
      WRITE(3,101) X
      WRITE(3,102) Y
      WRITE(3,105) Z
      QM=0.
      QD=3E—2
      TK=70.
      DT=1.
      CC=1.6
      K1=0
      KK=155
      DO 4 I=1,M1
      DO 4 J=1,M2
      DO 4 K=1,M3
      R1(I,J,K)=0.
      R2(I,J,K)=0.
      R3(I,J,K)=0.
      P1(I,J,K)=0.
    4 CONTINUE
      DO 55 I=2,N1
      DO 55 J=2,N2
      DO 55 K=2,N3
      R1(I,J,K)=1.7E—3
      R2(I,J,K)=1.7E—3
      R3(I,J,K)=1.7E—3
   55 CONTINUE
      DO 77 I=6,11
      DO 77 J=4,9
      DO 77 K=4,9
      P1(I,J,K)=QM*(2.*(Z(K)
     */(Z(3)*H3(3))**2+0.5)+QD
      R1(I,J,K)=2.3E—3
      R2(I,J,K)=1E—3
      R3(I,J,K)=2.3E—3
   77 CONTINUE
      DO 88 I=4,5
      DO 88 J=4,9
      DO 88 K=4,9
      P1(I,J,K)=QM*(2.*(Z(K)
     */(Z(3)—H3(3)))**2+0.5)+QD
      R1(I,J,K)=1E—3
      R2(I,J,K)=2.3E—3
      R3(I,J,K)=2.3E—3
   88 CONTINUE
      DO 89 I=12,13
      DO 89 J=4,9
      DO 89 K=4,9
      P1(I,J,K)=QM*(2.*(Z(K)
     */(Z(3)+H3(3)))**2+0.5)+QD
      R1(I,J,K)=1E—3
      R2(I,J,K)=2.3E—3
      R3(I,J,K)=2.3E—3
   89 CONTINUE
      DO 6 I=2,N1
      DO 6 J=2,N2
      DO 6 K=2,N3
      R1(I,J,K)=H1(I)/(2.*
     *R1(I,J,K)*H2(J)*H3(K))
      R2(I,J,K)=H2(J)/(2.*
     *R2(I,J,K)*H1(I)*H3(K))
      R3(I,J,K)=H3(K)/(2.*
     *R3(I,J,K)*H2(J)*R1(I))
      P1(I,J,K)=P1(I,J,K)*
     *H1(I)*H2(J)*H3(K)
    6 CONTINUE
      DO 66 I=1,M1
```

```
      DO 66 J=1,M2
      DO 66 K=1,M3
      U(I,J,K)=TK
      P2(I,J,K)=P1(I,J,K)
66    CONTINUE
      DO 7 I=2,N1
      DO 7 J=2,N2
      DO 7 K=2,N3
      R4(I,J,K)=1./(R1(I-1,J,
     *K)+R1(I,J,K)+1./
     *(R1(I,J,K)+P1(I+1,J,K))+
     11./(R2(I,J-1,K)+R2(I,J,
     *K))+1./(R2(I,J,K)+
     *R2(I,J+1,K))+
     21./(R3(I,J,K-1)+R3(I,J,
     *K))*1./(R3(I,J,K)+
     *R3(I,J,K+1))
7     CONTINUE
      T=0.
83    DO 84 I=2,N1
      DO 84 J=2,N2
      DO 84 K=2,N3
      P1(I,J,K)=P2(I,J,K)+
     *U(I,J,K)*CC/DT
     **H1(I)*H2(J)*H3(K)
84    CONTINUE
      TB=T
      S=1
      T1=0.
8     DO 9 I=2,N1
      DO 9 J=2,N2
      DO 9 K=2,N3
      W1=U(I,J,K)
      U(I,J,K)=(P1(I,J,K)+
     *U(I-1,J,K)/(R1(I-1,J,K)+
     *R1(I,J,K))+
     1U(I+1,J,K)/(R1(I,J,K)+
     *R1(I+1,J,K))+
     3U(I,J,K-1)/(R3(I,J,K-1)
     *+R3(I,J,K))+U(I,J,K+1)/
     *(R3(I,J,K)+R3(I,J,K+1))
     41))
     3+U(I,J-1,K)/
     **(R2(I,J-1,K)+R2(I,J,K))
      3U(I,J+1,K1)/(R2(I,J,K)+
     *R2(I,J+1,K)))
     4/(R4(I,J,K)+CC/DT*H1(I)
     **H2(J)*H3(K))
     U(I,J,K)=W*U(I,J,K)+
     *(1.-W)+W1
9     CONTINUE
      T=0.
      DO 68 I=1,M1
      DO 68 J=1,M2
      DO 68 K=1,M3
      IF(T-U(I,J,K))
     *69,68,68
69    T=U(I,J,K)
      K1=K
      J1=J
      I1=I
68    CONTINUE
      T3=ABS(T-T1)
      T1=T
      IF=(T3.LT.0.001) GOTO 10
      IF(T.GT.250)
     *GO TO 81
      S=S+1
      IF(P-S) 10,8,8
10    WRITE(3,106) T,
     *X(I1),Y(J1),Z(K1)
      WRITE(3,110) S
      SI=0.
      DO 67 K=1,M3
      DO 67 J=1,M2
      DO 67 I=1,M1
67    S1=S1+P2(I,J,K)
      WRITE(3,107) T3
      WRITE(3,103) S1
      TS=(T-TK)/S1
      TS=(T-TK)/S1
      WRITE(3,112) TS
      I2=0.
      T4=0.
      DO 70 I=4,13
      DO 70 K=4,9
      DO 70 J=4,9
      I2=I2+1
      T4=T4+U(I,J,K)
70    CONTINUE
      T4=T4/12
      WRITE(3,100) T4
      KI=KI+1
      IF(KI.GT.KK) GOTO 81
      IF(ABS(TB-T).GT.0.01)
     *GOTO 83
      GO TO 82
82    T=T
      WRITE(3,100) U
      END
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Предельно допустимые рабочие напряжения конденсаторов К71-4 и К72-11

Расчетные частотные зависимости предельно допустимого рабочего напряжения (действующее значение и полный размах) синусоидальной и симметричной трапецеидальной форм с косинусоидальными фронтами для конденсаторов типа К71-4 и К72-11 в блоках плотной упаковки при естественном (сплошные линии) и принудительном (пунктирные линии) воздушном охлаждении (V_o=3 м/с), $T_{o\,max}$=50°С и номинальных показателях надежности показаны на рис. 6.1—6.4 (режим электрического нагружения непрерывный, простой).

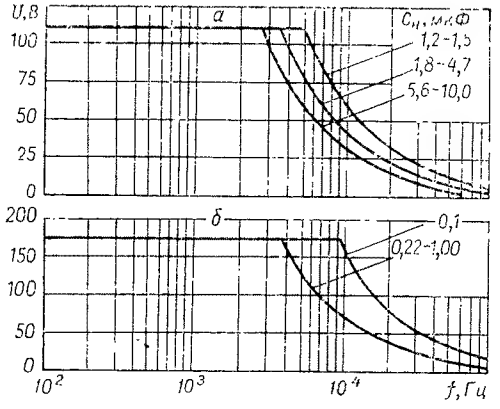


Рис. 6.1. Конденсаторы типа К71-4, напряжение синусоидальной формы $U_н$, В: *а* –160; *б* –250

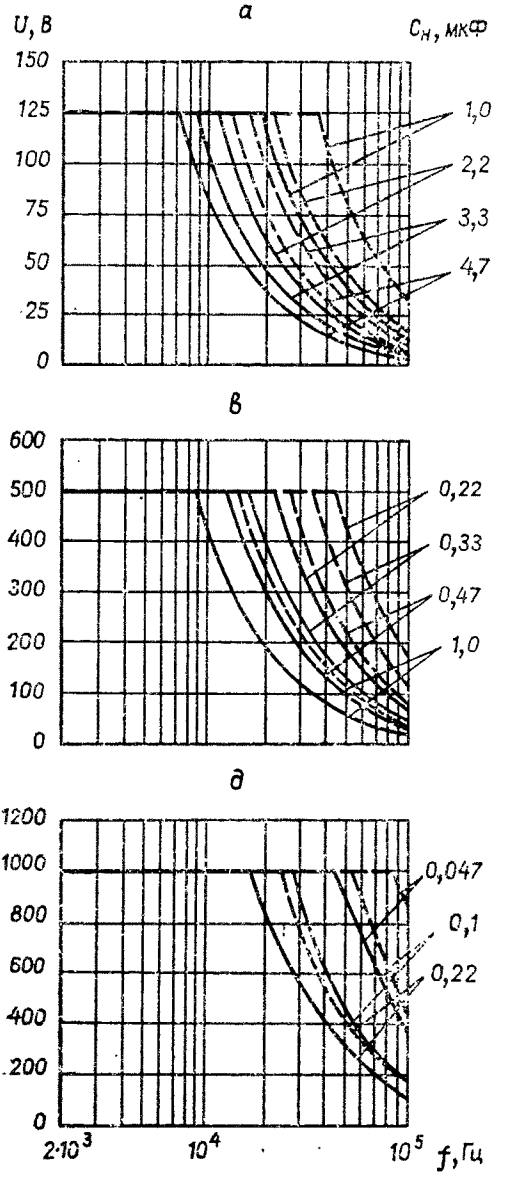
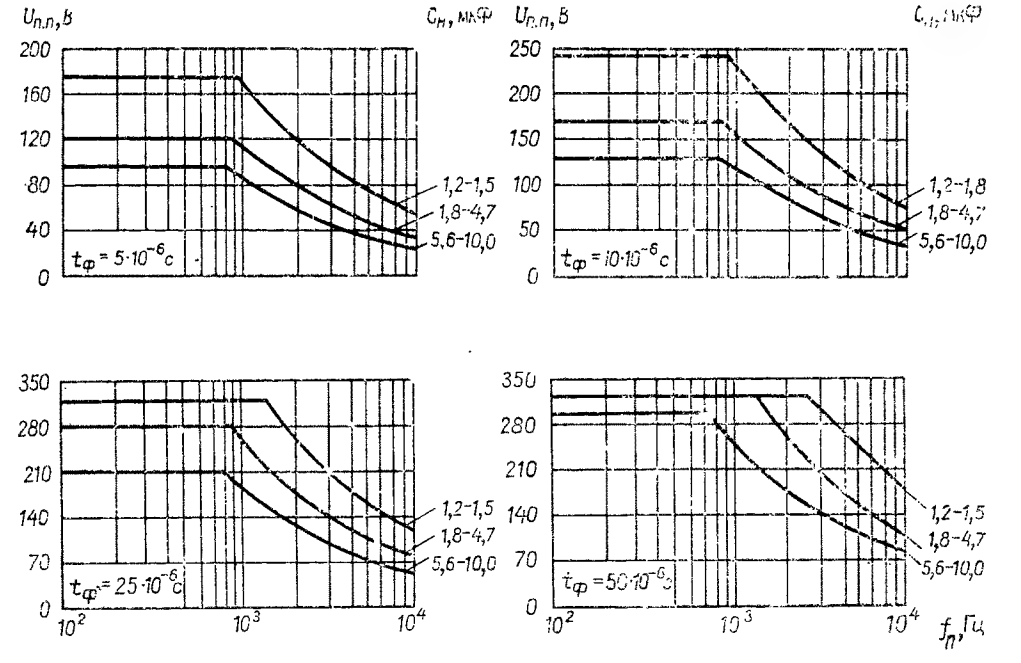


Рис. 6.2. Конденсаторы типа К72-11, напряжение синусоидальной формы. $U_н$, В: *а*—125, *б*—250; *в*–500; *г*—750; *д*—1000



б

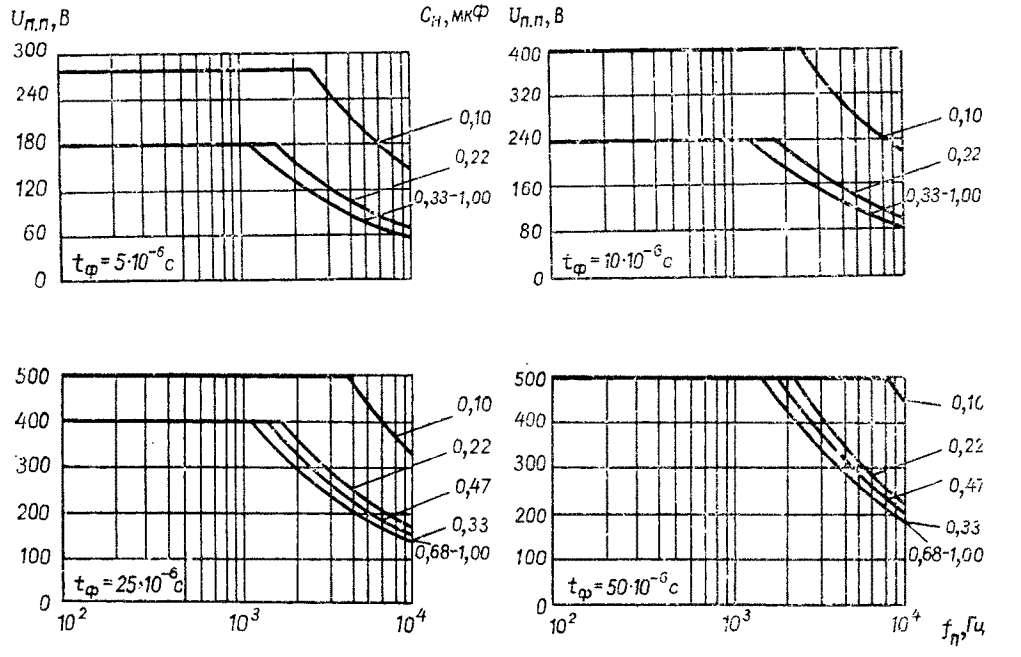
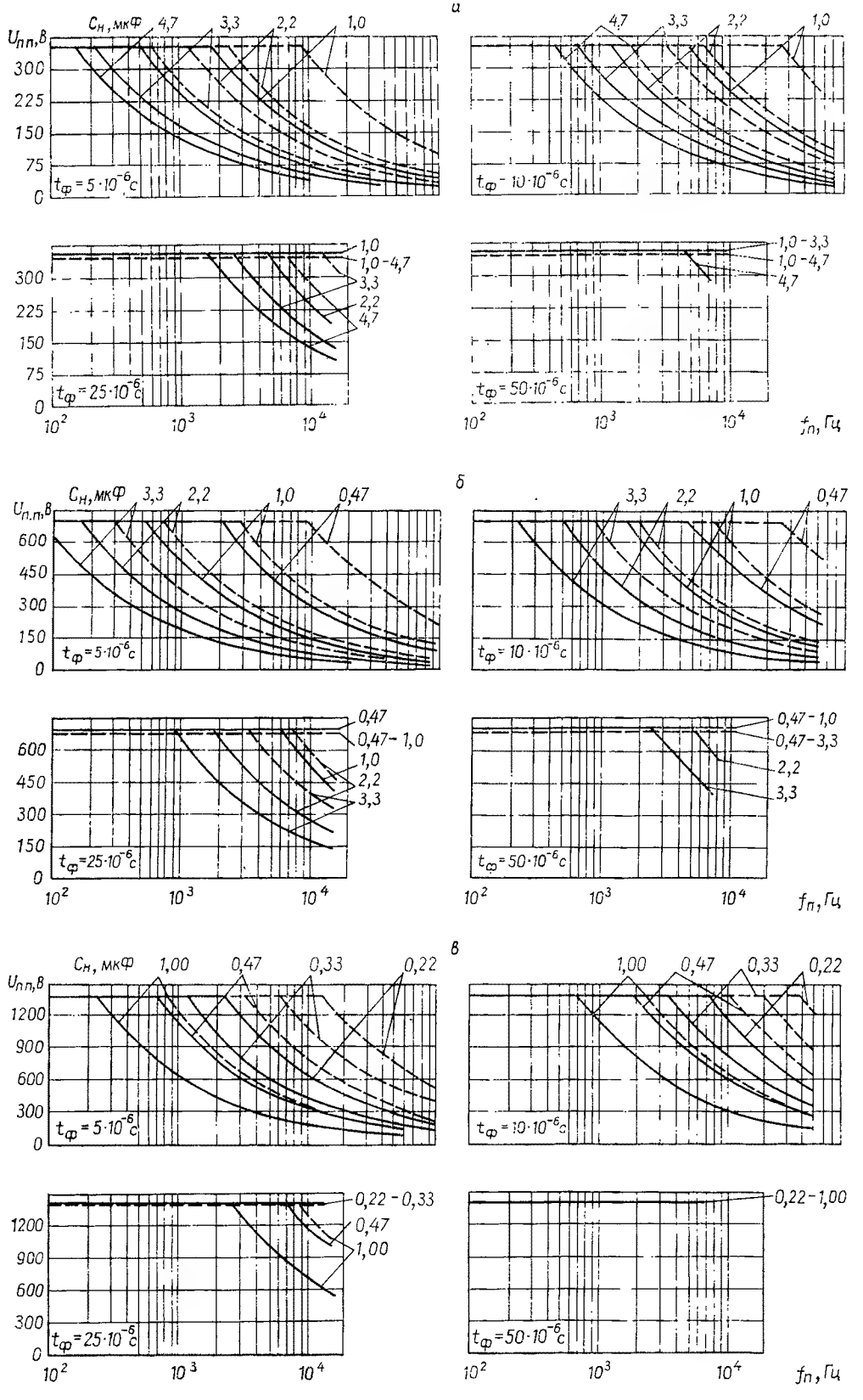


Рис. 6.3. Конденсаторы типа К71-4, напряжение трапецеидальной формы. $U_п$, В: *а*—160; *б*—250


а
$C_н$, мкФ
$U_{пп}$, В
4,7
3,3
2,2
1,0
$t_ф = 5 \cdot 10^{-6}$ с
$t_ф = 10 \cdot 10^{-6}$ с
1,0
1,0 - 4,7
3,3
2,2
4,7
$t_ф = 25 \cdot 10^{-6}$ с
1,0 - 3,3
1,0 - 4,7
4,7
$t_ф = 50 \cdot 10^{-6}$ с
10^2
10^3
10^4
$f_п$, Гц
б
$C_н$, мкФ
$U_{п.т}$, В
3,3
2,2
1,0
0,47
$t_ф = 5 \cdot 10^{-6}$ с
$t_ф = 10 \cdot 10^{-6}$ с
0,47
0,47 - 1,0
1,0
2,2
3,3
$t_ф = 25 \cdot 10^{-6}$ с
0,47 - 1,0
0,47 - 3,3
2,2
3,3
$t_ф = 50 \cdot 10^{-6}$ с
$f_п$, Гц
в
$C_н$, мкФ
$U_{пп}$, В
1,00
0,47
0,33
0,22
$t_ф = 5 \cdot 10^{-6}$ с
$t_ф = 10 \cdot 10^{-6}$ с
0,22 - 0,33
0,47
1,00
$t_ф = 25 \cdot 10^{-6}$ с
0,22 - 1,00
$t_ф = 50 \cdot 10^{-6}$ с
$f_п$, Гц

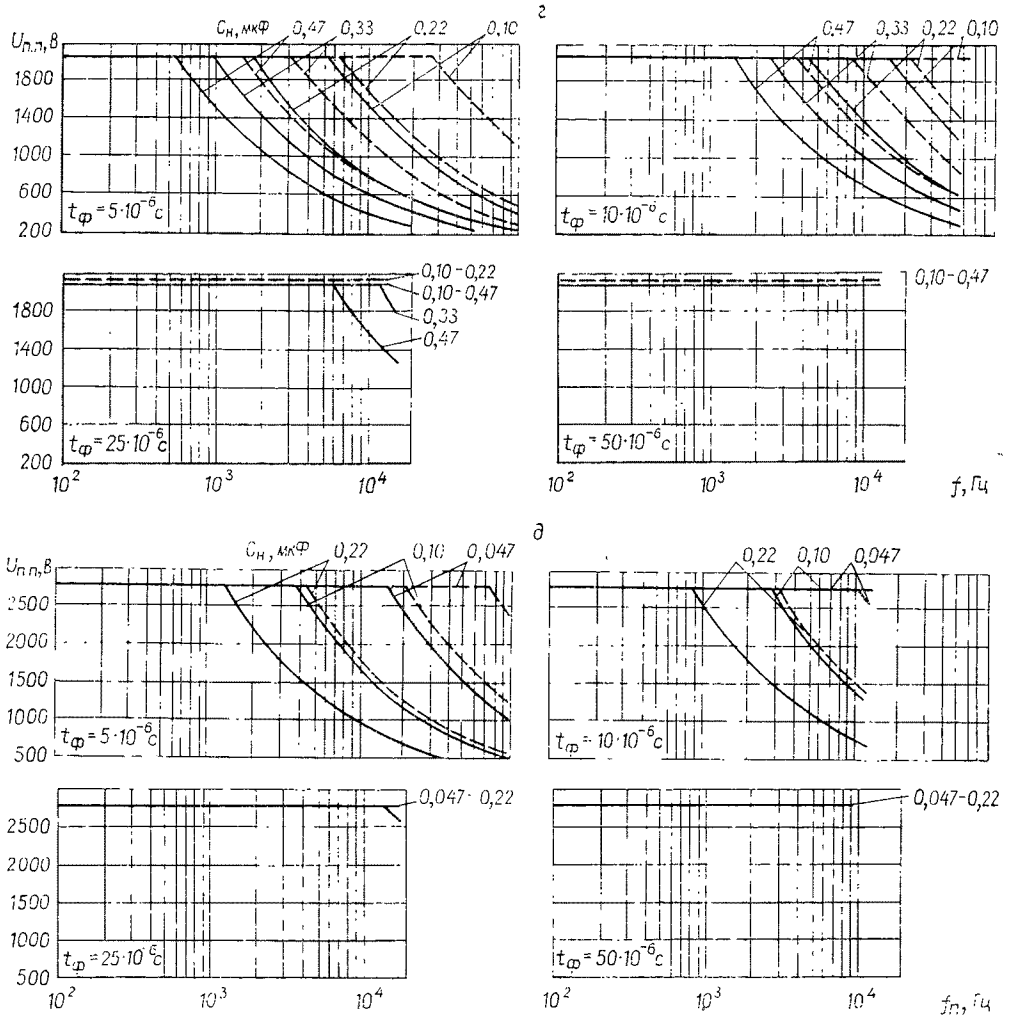


Рис. 6.4. Конденсаторы типа К72-11, напряжение трапецеидальной формы. $U_н$, В: *а*—125; *б*—250; *в*—500; *г*—750; *д*—1000

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Удельные параметры конденсаторов К71-4 и К72-11

Расчетные частотные зависимости удельных реактивных мощностей и энергий конденсаторов типа К71-4 и К72-11 при напряжении синусоидальной и симметричной трапецеидальной форм с косинусоидальными фронтами в блоках плотной упаковки при естественном (сплошные линии) и принудительном (пунктирные линии) воздушном охлаждении ($V_0 = 3$ м/с), $T_{0\,max} = 50$°С и номинальных показателях надежности приведены на рис. 7.1—7.4 (режим электрического нагружения непрерывный, простой).

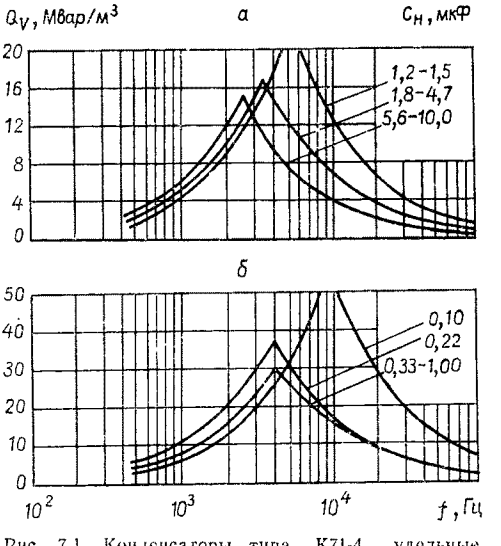


Рис. 7.1. Конденсаторы типа К71-4, удельные реактивные мощности. $U_н$, В: *а*—160; *б*—250

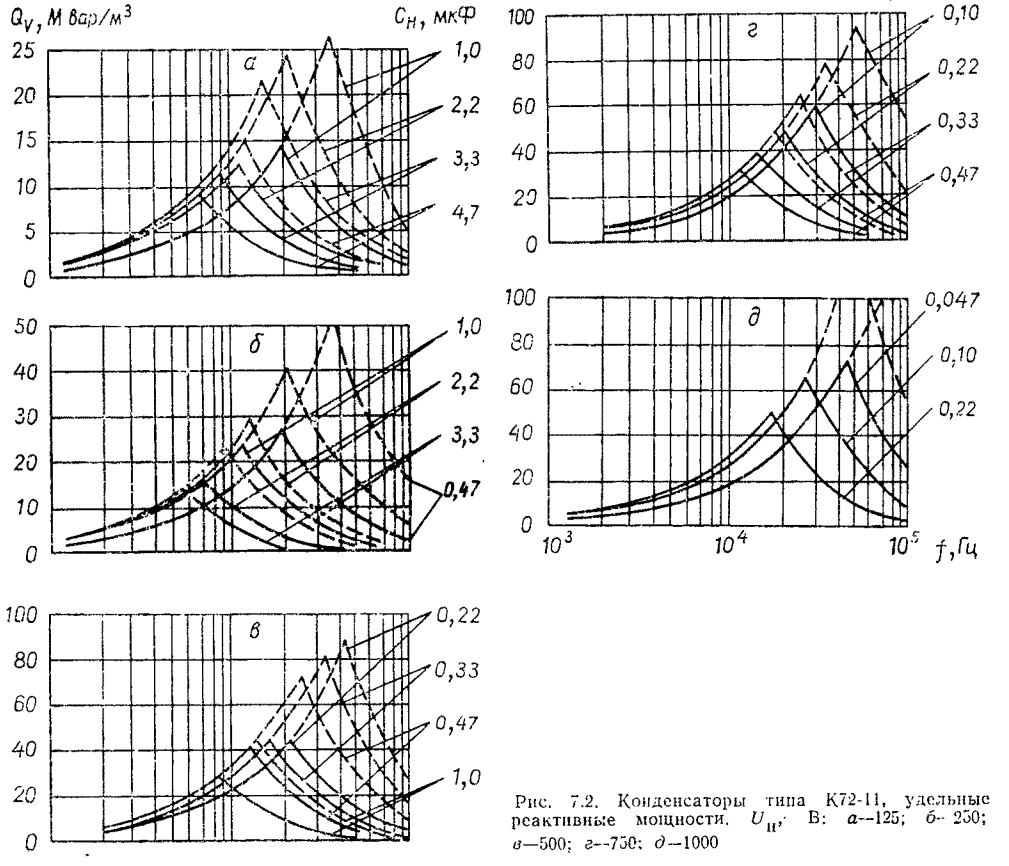
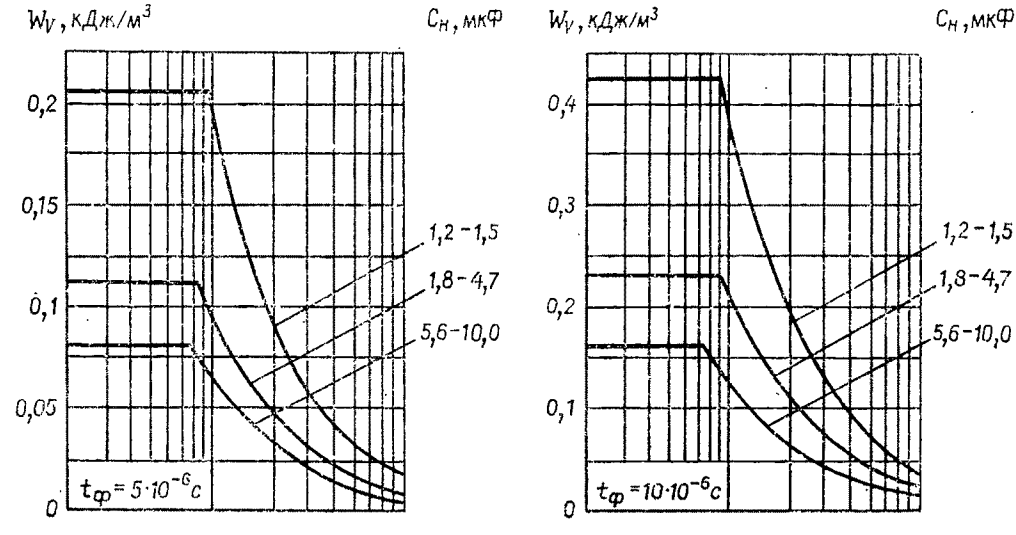


Рис. 7.2. Конденсаторы типа К72-11, удельные реактивные мощности. $U_ц$, В: *а*—125; *б*—250; *в*—500; *г*—750; *д*—1000

а



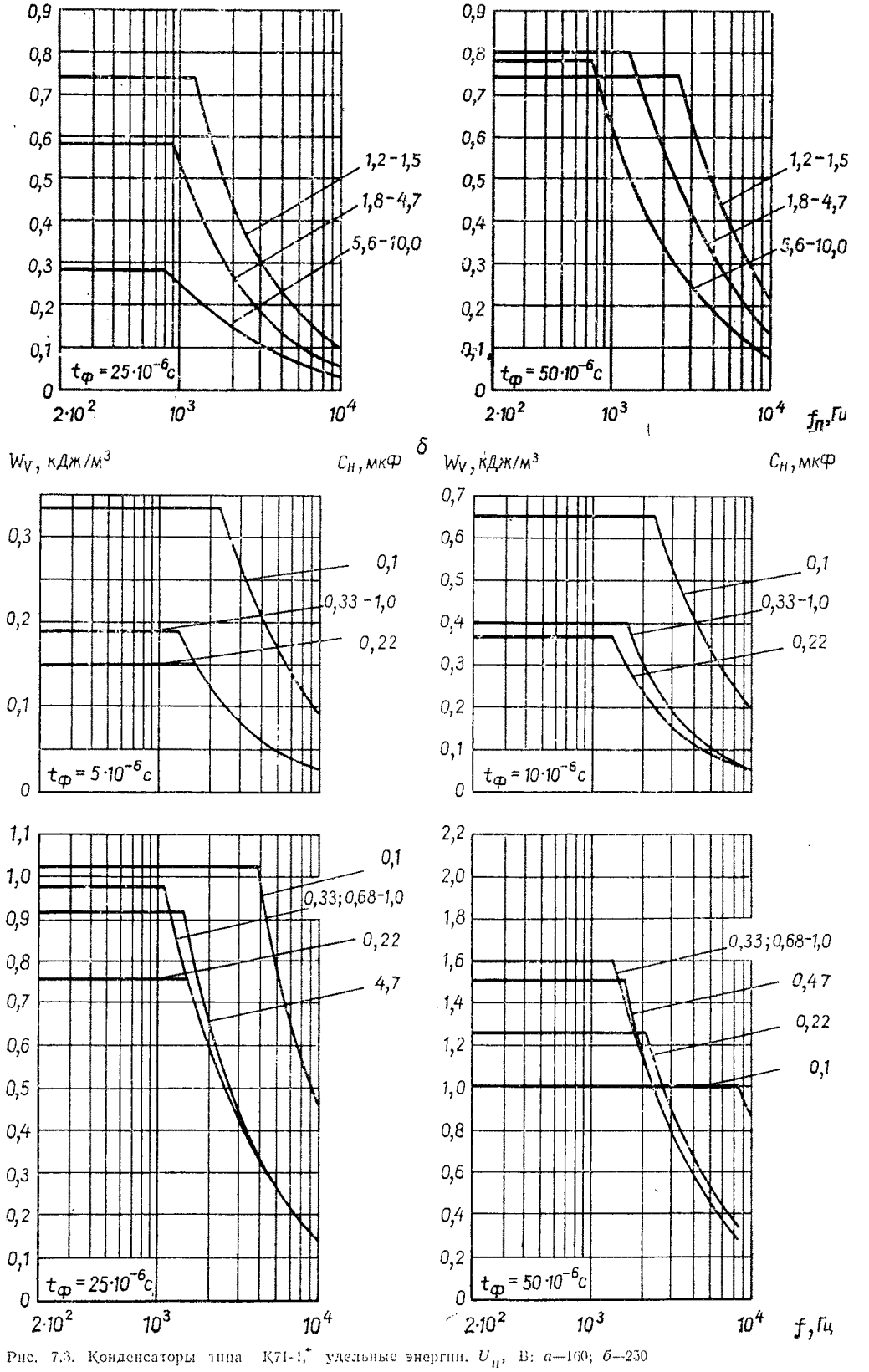
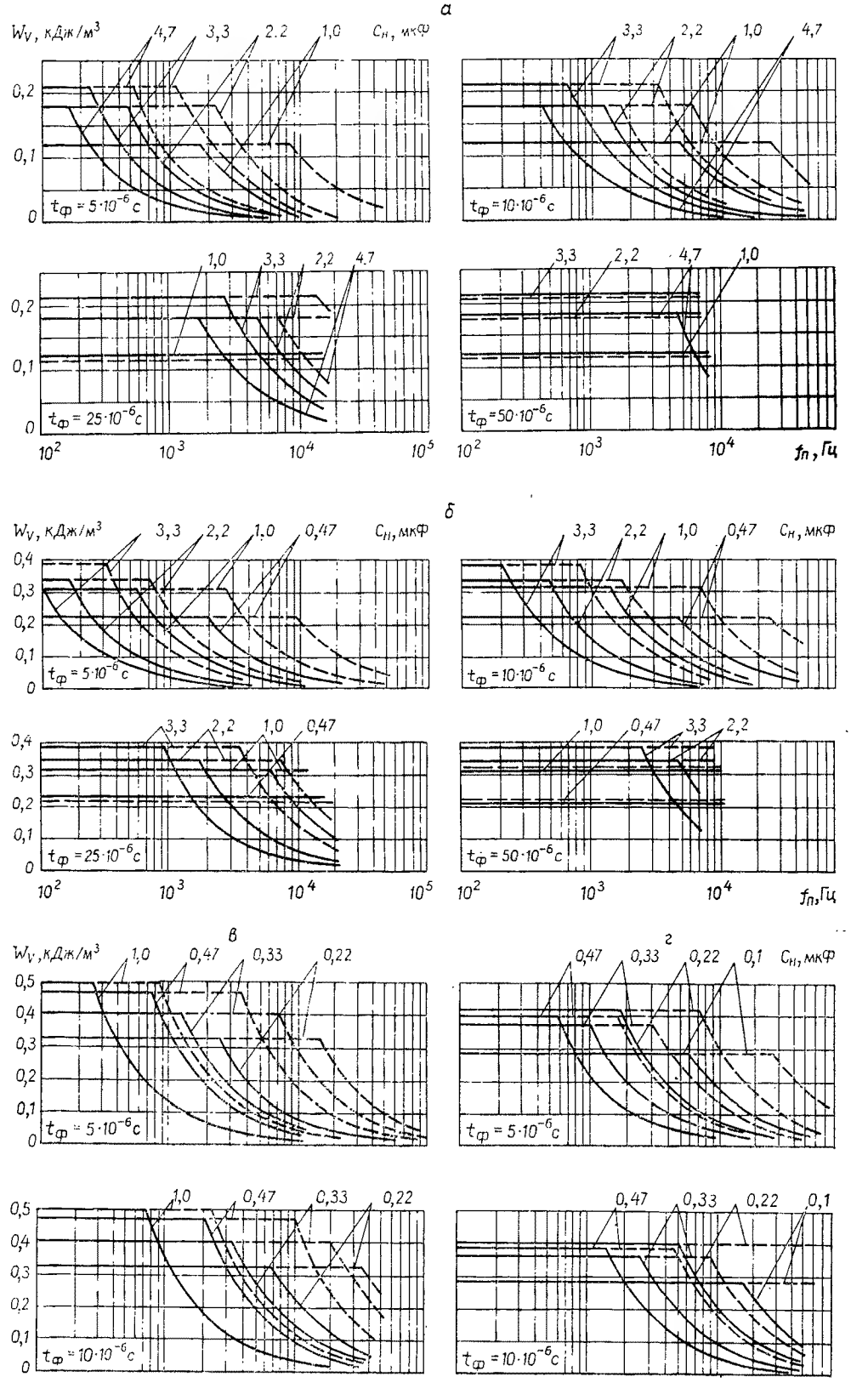


Рис. 7.3. Конденсаторы типа К71-1,* удельные энергии, $U_н$, В: *а*—160; *б*—250


а
W_V, кДж/м³
4,7
3,3
2,2
1,0
$C_н$, мкФ
0,2
0,1
0
$t_ф = 5 \cdot 10^{-6}$ с
$t_ф = 10 \cdot 10^{-6}$ с
$t_ф = 25 \cdot 10^{-6}$ с
$t_ф = 50 \cdot 10^{-6}$ с
10^2
10^3
10^4
10^5
$f_п$, Гц
б
W_V, кДж/м³
3,3
2,2
1,0
0,47
$C_н$, мкФ
0,4
0,3
0,2
0,1
0
$t_ф = 5 \cdot 10^{-6}$ с
$t_ф = 10 \cdot 10^{-6}$ с
$t_ф = 25 \cdot 10^{-6}$ с
$t_ф = 50 \cdot 10^{-6}$ с
$f_п$, Гц
в
W_V, кДж/м³
1,0
0,47
0,33
0,22
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
$t_ф = 5 \cdot 10^{-6}$ с
$t_ф = 10 \cdot 10^{-6}$ с
г
0,47
0,33
0,22
0,1
$C_н$, мкФ
$t_ф = 5 \cdot 10^{-6}$ с
$t_ф = 10 \cdot 10^{-6}$ с

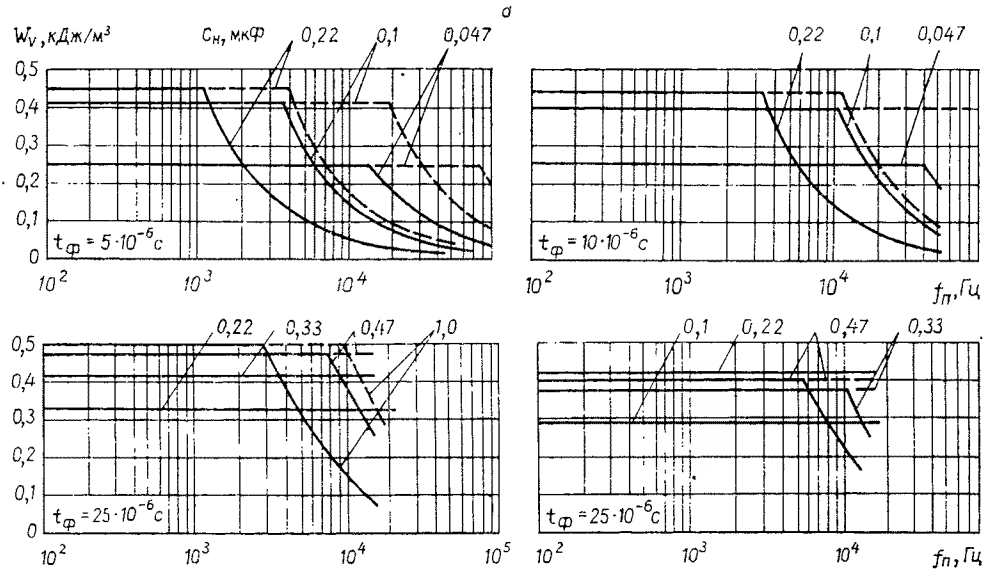


Рис. 7.4. Конденсаторы типа К72-11, удельные энергии. $U_н$, В: *а*—125; *б*—250; *в*—500; *г*—750; *д*—1000

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Расчет индуктивности элементов конструкции импульсных конденсаторов

Для большинства типов импульсных конденсаторов чрезвычайно важна малая индуктивность. Для снижения индуктивности в импульсных конденсаторах применяются специальные конструкции выводов и система размещения и соединения выводов секций.

Суммарная индуктивность конденсатора $L_э$ складывается из индуктивностей выводов $L_в$, пакета секции $L_п$ и соединительных шин $L_ш$.

Индуктивность выводов зависит от конструкции вывода и существенно возрастает с увеличением его длины и расстояния между выводами различных полярностей (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Формулы для расчета индуктивности выводов конденсатора $L_в$	Особенность конструкции
$L_в = \mu_0 l_в (\ln d_в / r_в) / N\pi$	Стержневой вывод $a_в \gg d_в$
$L_в = \mu_0 l_в [d_в / b_ш + a_в (\ln a_в / 2\pi r_в) / 2\pi b_ш]$	То же при $a_в \leqslant d_в$
$L_в = \mu_0 l_в (\ln r_ф / r_в) / 2\pi$	Коаксиальный вывод

В табл. 8.1 $l_в$ — длина токоведущей части стержня; $r_в$ — радиус стержня; $d_в$ — ближайшее расстояние между стержнями противоположной полярности; N — число стержней одной полярности; μ_0 — магнитная постоянная; $a_в$ — расстояние между стержнями одинаковой полярности; $b_п = a_в N$ — ширина участка, на котором расположены стержни одинаковой полярности; $r_ф$ — радиус заземленного фланца, или радиус окружности, по которой расположены токоведущие стержни вывода противоположной полярности.

Индуктивность пакета секций $L_п$ определяется индуктивностью секции $L_с$ и схемой соединения секций в пакете (табл. 8.2).

Таблица 8.2

Формулы для расчета индуктивности пакета $L_п$, обкладок L_1, секции $L_с$, индуктивности выводов секции $L_{в.с}$	Особенность конструкции
$L_п = L_с n_с / m_с$	Параллельное соединение секций
$L_1 = \mu_0 l_э (2d_ф + 3d)/3b_ф$	Несмещенные выводы расположены с одного конца обкладок
$L_с = L_1/2 + L_в + \mu_0 d l_ф/12 b_ф + L_{в.с}$	Несмещенные выводы расположены посередине длины обкладок
$L_с = \mu_0 d l_ф/12 b_ф + L_2 + L_{в.с}$	Выводы находятся у середины обкладок и смещены относительно друг друга в пределах ширины секции на $^1/_2$ или кратное $^1/_2$ число оборотов
$L_{в.с} = \mu_0 l_в (\ln A/b_в + 3/2)/\pi$	Смещенные в пределах ширины секции выводы; A — расстояние между осями выводов
$L_э = L_с + L_{в.с} = \mu_0 H_к (\ln D_к/D_с + 1/4)/2\pi + L_{в.с}$	Цилиндрический односекционный конденсатор с возвратом тока по корпусу

В табл. 8.2 d — расстояние между обкладками; $b_ф$ и $d_ф$ — соответственно ширина и толщина обкладок; L_2 — индуктивность соседних частей обкладок, расположенных между выводами секции и обтекаемых током в одном направлении; $d_в$, $b_в$ и $l_в$ — соответственно толщина, ширина и длина вывода; a — расстояние между выводами; $D_с$ — наружный диаметр секции; $D_к$ — внутренний диаметр корпуса; $H_к$ — высота конденсатора.

Индуктивность секции $L_с$ в свою очередь определяется ее геометрическими размерами, количеством и размерами выводов, а также их расположением.

В конденсаторных секциях рулонного типа выводы выполняются в основном в виде медных шинок и располагаются для уменьшения индуктивности с одного торца.

При расположении выводов друг против друга, индуктивность выводов рассчитывается по второй формуле табл. 8.2, в которой

$l_э = l_в/3$; $d_ф = d_в$;
$a = d$; $b_ф = b_в$.

Уменьшение индуктивности секции может быть достигнуто за счет размещения нескольких пар выводов, равномерно расположенных по длине фольги. Если число пар выводов равно $n_в$ и ток между выводами одной полярности распределяется

Таблица 8.3

Формулы для расчета индуктивности шин $L_ш$	Особенность конструкции
$L_ш = \mu_0 S_ш / b_ш$	Большое количество последовательно соединенных секций или групп секций; крайние секции соединены плоскими шинами с выводами конденсатора
$L_ш = \mu_0 d_ш l_ш / b_ш$	Большое количество параллельно соединенных секций; все секции присоединяются к шинам на одинаковом расстоянии (по шине) относительно выводов конденсатора
$L'_ш = \mu_0 d_ш l'_ш / l_ш$	Конденсатор состоит из $m_с$ параллельно соединенных секций, присоединенных равномерно вдоль длины шин, соединенных с выводами конденсатора

В табл. 8.3 $S_ш$ — площадь сечения пространства, заключенного между шинами и пакетом; $b_ш$ и $l_ш$ — соответственно ширина и длина шин; $d_ш$ — расстояние между шинами; $l'_ш$ — длина участка шин между соседними секциями.

Суммарная индуктивность конденсатора для первого и второго случаев (см. табл. 8.3) равна

$$L_э = L_п + L_ш + L_в.$$

Индуктивность конденсатора в третьем случае (см. табл. 8.3) в режиме установившихся колебаний составляет

$$L_э = L_с/m_с + m_с L'_ш/3.$$

равномерно, то индуктивность обкладок уменьшается обратно пропорционально n^2, а индуктивность системы выводов—обратно пропорционально $n_в$. При этом расположение выводов должно быть таким, чтобы обеспечивалось равномерное распределение тока между каждой парой выводов с учетом индуктивности каждой пары.

Следует учитывать, что для плоских секций при наличии в пакете последовательно соединенных секций применение «безындукционной» намотки приводит к значительной индуктивности всего пакета. Это объясняется тем, что в данном случае ток идет по зигзагообразному пути. Причем индуктивность каждого зигзага определяется эквивалентной индуктивностью петли из двух шин сечения, равным поперечному сечению секции, с противоположным направлением токов при весьма малом расстоянии между шинами с равномерно распределенным током по сечению шины, и взаимной индуктивностью соседних петель.

Индуктивность шин, соединяющих секции конденсатора с выводами, и индуктивность конденсатора. Способ соединения пакета секций, главных шин и выводов конденсатора и другие конструктивные особенности сильно сказываются на величине его индуктивности (табл. 8.3).

SUMMARY

The reference book contains general information on capacitors, their technical parameters and characteristics.

Notations, classifications of capacitors, their functions in technical facilities, as well as the fields of their application are given. Such physical phenomena, occuring in capacitors, as polarization, heat release, partial discharge, etc., are described in brief there.

Main capacitors versions and data on materials utilized in their construction are considered.

Electrical and thermal properties, as well as characteristics of capacitors, i. e. capacitance, the loss tangent, insulation resistance, thermal resistance, time constant, etc., are described in detail.

The book casts a light on problems of the capacitors application, i. e. calculation of electrical and thermal conditions; conditions ensuring the capacitors serviceability; determination of limiting allowed values of working voltage at sinusoidal and non-sinusoidal shapes of voltage under continuous and non-continuous loading, as well as the option of capacitors for operation under various conditions.

The Appendix gives the programs which allow to calculate the parameters of electric circuits for the capacitors replacement, the heat release intensity at complex shapes of nonsinusoidal voltage, stationary and dynamic thermal fields; information on thermal properties, allowed voltages and specified parameters of several types of capacitors is given there as well.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3
ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В СПРАВОЧНИКЕ . 6

РАЗДЕЛ I. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О КОНДЕНСАТОРАХ

Глава 1. Общие сведения о конденсаторах 9
§ 1.1. Функции и области применения 9
§ 1.2. Условия эксплуатации конденсаторов. Требования и определения 11
§ 1.3. Классификация конденсаторов 15
§ 1.4. Система обозначения конденсаторов 17
§ 1.5. ГОСТы и ОСТы по тематике справочника 21
Глава 2. Физические явления в электрических конденсаторах . . 22
§ 2.1. Поляризация диэлектрика. 22
§ 2.2. Электрические токи в конденсаторах 28
§ 2.3. Тепловыделение в конденсаторах 30
§ 2.4. Частичные разряды в изоляции конденсаторов 33
§ 2.5. Самовосстановление в конденсаторах 41
§ 2.6. Шумы в конденсаторах . 43
Глава 3. Материалы и конструкции конденсаторов 43
§ 3.1. Материалы конденсаторостроения и их свойства . . . 43
§ 3.2. Конструкции конденсаторов с твердым органическим диэлектриком 49
§ 3.3. Конструкции конденсаторов с твердым неорганическим диэлектриком 52
§ 3.4. Конструкции конденсаторов с оксидным диэлектриком . 54
Глава 4. Параметры и характеристики конденсаторов 55
§ 4.1. Емкость, тангенс угла потерь, мощность и энергия конденсаторов 55
§ 4.2. Ток утечки, сопротивление изоляции и коэффициент абсорбции конденсаторов 68
§ 4.3. Электрические схемы замещения конденсаторов . . . 73
§ 4.4. Тепловые параметры и характеристики конденсаторов . . 81
§ 4.5. Параметры и характеристики критического теплового режима 89
§ 4.6. Электрическая прочность конденсаторов 93
§ 4.7. Удельные параметры одиночных конденсаторов и батарей 103
§ 4.8. Общие сведения о надежности конденсаторов 110
§ 4.9. Расчет показателей надежности конденсаторов по экспериментальным данным 115
Литература к разделу I 118

РАЗДЕЛ II. ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

Глава 5. Расчет электрических и тепловых режимов конденсаторов . 122
§ 5.1. Общие сведения об электрических и тепловых режимах работы конденсаторов 122
§ 5.2. Расчет токовых нагрузок конденсаторов 131
§ 5.3. Расчет мощности и энергии потерь в конденсаторах . . . 150
§ 5.4. Расчет температурного поля конденсаторов 160
§ 5.5. Расчет максимальных и средних температур конденсаторов 165
Глава 6. Основные условия обеспечения работоспособности конденсаторов 169
§ 6.1. Влияние теплового режима на работоспособность конденсаторов 169
§ 6.2. Влияние характера и параметров воздействующего напряжения на работоспособность и долговечность конденсаторов . 179
§ 6.3. Влияние климатических, механических и понизирующих факторов на работоспособность конденсаторов 187
Глава 7. Определение предельно допустимых параметров рабочего напряжения и режимов нагружения конденсаторов 191
§ 7.1. Общие принципы определения допустимых параметров ра-

бочего напряжения конденсаторов 191
§ 7.2. Предельно допустимые значения и частота напряжения синусоидальной формы в непрерывных режимах нагружения . 192
§ 7.3. Предельно допустимые значения и частота напряжения синусоидальной формы в прерывистых режимах нагружения . . 196
§ 7.4. Предельно допустимые параметры несинусоидального напряжения типовых форм в непрерывных режимах нагружения . 198
§ 7.5. Предельно допустимые параметры несинусоидального напряжения типовых форм в прерывистых режимах нагружения . 204
§ 7.6. Предельно допустимые значения и частота несинусоидального напряжения сложной формы в непрерывных и прерывистых режимах нагружения 205
§ 7.7. Предельно допустимые параметры напряжения конденсаторов в емкостных накопителях энергии 207
§ 7.8. Особенности расчета предельно допустимых параметров напряжения, содержащего постоянную составляющую . . . 209
§ 7.9. Определение экстремальных параметров режимов нагружения конденсаторов 211
§ 7.10. Эквивалентирование режимов нагружения конденсаторов . 213
Глава 8. Выбор конденсаторов . . 214
§ 8.1. Общие принципы выбора конденсаторов 214
§ 8.2. Выбор конденсаторов для работы на синусоидальном напряжении в непрерывном режиме 222
§ 8.3. Выбор конденсаторов для работы в непрерывном режиме при несинусоидальном напряжении 224
§ 8.4. Выбор конденсаторов для работы в прерывистых режимах 230
§ 8.5. Особенности выбора конденсаторов при наличии постоянной составляющей напряжения . 231
§ 8.6. Особенности выбора конденсаторов для работы в импульсном режиме 233
Литература к разделу II . . . 236
Приложение 1. Определение параметров схемы замещения диэлектриков и конденсаторов . . . 241
Приложение 2. Расчет мощности и энергии тепловыделения в конденсаторах при произвольных формах воздействующего напряжения 254
Приложение 3. Тепловые параметры конденсаторов типа К40У-9, К42У-2, К71-4, К71-5, К72-11, К72П-6, К73-9, К73-11, К73-15, К73-16, К75-10, К75-12, К75-24, К76П-1, К77-1 273
Приложение 4. Расчет стационарных тепловых полей конденсаторов . 281
Приложение 5. Расчет нестационарных тепловых полей конденсаторов 292
Приложение 6. Предельно допустимые рабочие напряжения конденсаторов К71-4 и К72-11 . . . 297
Приложение 7. Удельные параметры конденсаторов К71-4 и К72-11 301
Приложение 8. Расчет индуктивности элементов конструкции импульсных конденсаторов 305
Резюме 308

ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ БЕРЗАН
БОРИС ЮЗИКОВИЧ ГЕЛИКМАН
МИХАИЛ НИКОДИМОВИЧ ГУРАЕВСКИЙ
ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ ЕРМУРАТСКИЙ
ПЕТР ВАСИЛЬЕВИЧ ЕРМУРАТСКИЙ
ГЕОРГИЙ СТАНИСЛАВОВИЧ КУЧИНСКИЙ
ОЛЕГ ЛЕОНИДОВИЧ МЕЗЕНИН
НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ НАЗАРОВ
ВАЛЕНТИН КСЕНОФОНТОВИЧ РИМСКИЙ
БОРИС КОНСТАНТИНОВИЧ СМИРНОВ
КЛАВДИЯ ИВАНОВНА СТЕПИНА

СПРАВОЧНИК ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ КОНДЕНСАТОРАМ

Общие сведения, выбор и применение

Утверждено к изданию
Редакционно-издательским советом
АН МССР

Редакторы
Г. С. Байчурина, Н. П. Мурашова
Художник
А. Ф. Святченко
Художественный редактор
П. П. Власенко
Технический редактор
Е. И. Попушой
Корректоры
О. И. Попа, Н. И. Корчмарь, А. В. Сушкевич

ИБ № 1060

Сдано в набор 30.06.81.
Подписано к печати 31.03.82.
АБ06451.
Формат 70×108¹/₁₆.
Бумага типографская № 1.
Литературная гарнитура.
Печать высокая.
Усл. печ. л. 27,3.
Усл. кр. отт. 164,2.
Уч.-изд. л. 31,0.
Тираж 6015.
Заказ 431.
Цена 2 р. 10 к.

Издательство «Штиинца», 277028,
Кишинев, ул. Академическая, 3

Типография издательства «Штиинца»,
277004, Кишинев, ул. Берзарина, 8